

Теория и практика космического телевидения





Увидеть впервые Луну и другие планеты
с близкого расстояния мы, несомненно,
сможем глазами телевидения,
которое откроет нам виды новых миров

В. К. Зворыкин



Здесь,
в Всесоюзном
научно-исследовательском
институте телевидения,
в 1956-1959 годах
была создана
первая в мире
космическая
телевизионная
система.

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Под редакцией
доктора техн. наук А. А. Умбиталиева,
доктора техн. наук А. К. Цыцулина



АО «НИИ телевидения»

Санкт-Петербург

2017

УДК 621.397 (024)

ББК 32.94

Т 26

Авторы: Умбиталиев А. А., Цыцулин А. К., Левко Г. В., Пятков В. В., Кузичкин А. В., Дворников С. В., Шипилов Н. Н., Манцветов А. А., Адамов Д. Ю., Бобровский А. И., Козлов В. В., Богданов Ю. Г., Царелунго А. Б., Ибатуллин С. М., Иванов К. В., Зеленова В. В.

Т 26 Теория и практика космического телевидения.

Под ред. А. А. Умбиталиева, А. К. Цыцулина. СПб.: НИИ телевидения, 2017. 368 с., ил.

Книга на новом теоретическом и технологическом уровне продолжает раскрытие особенностей наукоёмкой отрасли техники, начатое в книге «Космическое телевидение», которая выпускалась в 1967 и 1973 гг. и также была написана сотрудниками (тогда Всесоюзного) НИИ телевидения. Компактность издания достигнута изложением лишь собственных результатов, полученных за 60 лет, прошедших со дня подписания С. П. Королёвым первого технического задания на разработку телевизионной системы для космоса. Рассмотрены методы достижения максимального качества информации в тяжёлых условиях, связанных с широчайшим диапазоном световых условий, ограничениями сложности, мощности, факторами воздействия космического пространства и с высокой требуемой надёжностью. Предложены новые методы построения систем космического телевидения, в том числе основанные на переходе от классического малокадрового телевидения к когнитивным радиотехническим системам, в которых развит принцип адаптации телевизионных систем как кодеков многомерных оптических сигналов (основанный на перестройке всех параметров – чёткости, кадровой частоты, разрядности сигнала, полосы частот радиоканала, методов и параметров модуляции) и к изодинамическим (динамически сбалансированным) системам.

Кроме рассмотрения современных отечественных систем космического телевидения с учётом естественных изменений уровня технологии космической видеоинформационной техники, даны взгляды на её методологию, историю и перспективы.

Для инженерно-технических работников, связанных с разработкой информационных систем передачи и обработки изображений; может быть полезна аспирантам и студентам старших курсов радиотехнических и компьютерных специальностей.

УДК 621.397 (024)

ББК 32.94

Рецензенты:

доктор технических наук,
профессор **Ю. С. Сагдуллаев**
(ЗАО «МНИТИ»);

доктор технических наук,
старший научный сотрудник **Д. В. Кириченко**
(ВКА им. А. Ф. Можайского).

© авторы, 2017

ПРЕДИСЛОВИЕ

Космическая деятельность относится к категории высших государственных приоритетов России вне зависимости от социально-экономических реформ и преобразований и, безусловно, должна базироваться на государственной поддержке – политической, экономической, юридической. Космос требует внедрения целого спектра перспективных технологий (конструктивно-технологических, проектных, управленческих и т. д.), многие из которых появляются на стыке разных сфер научно-технической и производственной деятельности.

Такой взгляд полностью соответствует Стратегии развития российской космонавтики до 2035 года, в которой описаны основные направления реформирования системы планирования и управления космической деятельностью, а также ключевые технологии, позволяющие обеспечить сохранение Россией статуса ведущей космической державы.

Космическое телевидение – крупное научно-техническое направление, родившееся в нашей стране. Первенцем отечественного и мирового космического телевидения стала система, как сегодня сказали бы, «дистанционного зондирования обратной стороны Луны», реализовавшая в 1959 г. в составе АМС «Луна-3» первую задачу телевидения в космосе, поставленную С. П. Королёвым – обеспечить интересы беспилотной космонавтики по наблюдению из космоса Земли и планет. Прошло всего полтора года, и космическое телевидение выполнило второе задание С. П. Королёва – обеспечило передачу изображения Ю. А. Гагарина во время его исторического полёта 12 апреля 1961 г., в день, который теперь отмечается как день космонавтики.

За прошедшее время космическое телевидение распространилось очень широко не только по количеству стран, разрабатывающих системы, но и по задачам: это и научные исследования дальнего космоса и планет солнечной системы, и дистанционное

зондирование Земли, и спутниковые ретрансляторы на геостационарной орбите, обеспечивающие «Космовидение». Этот широкий фронт отражает стратегию использования космического пространства, заложенную С. П. Королёвым, который знал, что телевидение будет работать в космосе и для помощи космонавтам, и для наблюдения Земли в интересах метеорологии, геологии, обороны, науки и утверждал: *«ракета, запущенная в космос без радиотелевизионной аппаратуры подобна камню, брошенному из средневековой пращи»*.

Кроме такой целевой радиотелевизионной аппаратуры – например, исследования различных небесных тел и Земли в том числе – сформировалось дополнительное направление, по истокам и технологии относящееся к космическому телевидению – звёздные и солнечные датчики ориентации космических аппаратов, без которых сейчас не обходятся системы автономной навигации, системы ориентации и управления движением.

В результате родилось необозримое количество систем наблюдения космического базирования, выпускаются специальные объёмные книги энциклопедического характера как по космонавтике в целом, так и по ряду проблем, возникающих в ходе проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов, систем внеатмосферной астрономии, систем дистанционного зондирования Земли, космической разведки и т.д. Эти издания подробно освещают проблематику космических наблюдений в контексте собственных задач.

Эта книга – не энциклопедия и не справочник, она о концепциях и методологии космического телевидения. В ней развиваются, в частности, идея С. И. Катаева о малокадровом телевидении, которое оказалось востребованным только космической техникой, и идея С. П. Королёва об итерационном характере управления движением при сближении и стыковке космических аппаратов. Авторы вполне обоснованно не наращивали объём книги за счёт литературы (напечатанной и в виде электронных ресурсов) справочного характера, как по системам, так и по ЭКБ, и сосредоточились на материале, относящемся к прошлому, настоящему,

будущему лишь фрагмента отечественного космического телевидения, связанного с некогда Всесоюзным институтом телевидения. Авторы – участники создания видеoinформационных систем Российского сегмента МКС, перспективной транспортной космической системы, ряда систем оборонного назначения.

Заслугой авторов, и теоретиков, и практиков космического телевидения, является глубокий взгляд на эту отрасль космической радиоэлектроники, детализирующий методологию проектирования и соответствующий идее выдающегося философа науки Станислава Лема, писавшего о роли «технологов»: *«Чтобы "соорудить" звезду или эволюцию, нужно знать гораздо больше, чем для того, чтобы создать научную теорию для каждого из этих объектов. Отсюда следует, что производственный рецепт означает более высокий уровень овладения материальным явлением, чем научная теория... Чтобы нечто предвидеть, необходимо, как правило, меньше информации, чем чтобы это "нечто" осуществить».*

В частности, для предвидения космического телевидения знаменитому советскому фантасту Александру Беляеву в его романе «Прыжок в ничто» было достаточно «на газетном уровне» знать идеи К. Э. Циолковского и результаты создателя электронного телевидения В. К. Зворыкина. Для того чтобы «осуществить» космическое телевидение, нужно было, да нужно и теперь знать гораздо больше – об этом и рассказывает эта книга.

Можно надеяться, что знакомство читателей, в первую очередь сегодняшних и будущих создателей образцов космического приборостроения, с достижениями и возможностями космического телевидения станет дополнительным импульсом для разработки оригинальных систем и концепций для пилотируемой и беспилотной отечественной космонавтики.

Генеральный конструктор пилотируемых программ РФ,
Генеральный конструктор
РКК «Энергия» им. С. П. Королёва», академик РАН

Е. А. Микрин

ОТ АВТОРОВ

«Точкой кристаллизации» этой книги стала когда-то бывшая настольной у инженеров ВНИИТа книга «Космическое телевидение» [1]. Как и рождение космического телевидения, так и книга [1] о нём, неразрывно связаны с отцом космического телевидения С. П. Королёвым, чьи идеи [2] определили все «зачем» и «что» в космическом телевидении. В первое, королёвское, десятилетие космической эры эти идеи воплощались в жизнь ВНИИТом при лидерстве П. Ф. Брацлавца, признанного Федерацией космонавтики России создателем космического телевидения, учредившей соответствующую медаль.

Важное влияние на предлагаемую вниманию читателей книгу оказал ряд более поздних изданий [3]–[32] по проблемам космонавтики и космической радиоэлектроники. Ядро этой книги определили книги [33]–[37], написанные сотрудниками НИИ телевидения и большой ряд статей в журнале «Вопросы радиоэлектроники, серия Техника телевидения», среди которых важнейшие для обсуждаемой темы [38]–[43]. Авторы надеются, что они смогли донести до читателей важнейшие изменения в космическом телевидении, в первую очередь переход от концепции малокадрового телевидения к когнитивным радиотехническим системам, которые могут быть названы изодинамическими (или динамически сбалансированными) системами, выравнивающими ошибки кодирования по всем аргументам. Эта концепция развивает принцип адаптации телевизионных систем как кодеков многомерных оптических сигналов, благодаря перестройке всех параметров – чёткости, кадровой частоты, разрядности сигнала, полосы частот радиоканала, методов и параметров модуляции.

Конечно, космическое телевидение – не изолированная область техники: каждый боец на фронте должен знать своего соседа слева и справа. На научно-техническом фронте ситуация не проще – надо знать соседей не только слева и справа, но ещё и «спереди» и «сзади». Для космического телевидения такими «соседями спереди» являются идеологи и создатели космических экспериментов и аппаратов и космической отрасли в целом, «соседями сзади» – разработчики технологий и устройств микроэлектроники, приборов и методов испытаний космического оборудования, «соседями

справа и слева» – разработчики прикладных телевизионных систем (для армии и флота, МЧС и МВД, Минатома и охраны) и других приборов и комплексов космических аппаратов, как целевых (например, навигационных, радиолокационных), так и обеспечивающих само существование космических аппаратов (энергообеспечение, управление движением, ориентация и стабилизация, телеметрия).

Мы описываем только один из фрагментов отечественного космического телевидения, которое многогранно. Практически «за кадром» остались многие современные отечественные и зарубежные системы ДЗЗ, разведки и обнаружения ракет, требующие отдельных книг (их обзор есть в [16], [37]). Здесь мы усматриваем такую важную аналогию: первый Спутник С. П. Королёв запустил «в ознаменование» столетия со дня рождения К. Э. Циолковского, он же обеспечил рождение космического телевидения – воплощения «ракеты с радиотелевизионной аппаратурой на борту» для *передачи из космоса по радиоканалу* изображения обратной стороны Луны – к столетию со дня рождения изобретателя радиосвязи А. С. Попова. И как космонавтика и радиосвязь стали достоянием всего человечества, так и космическое телевидение стало теперь всеобщим достоянием, и большое количество стран и огромное количество предприятий создают новые системы космического телевидения (описание, включающее и отечественное, и зарубежное космическое телевидение, дано в [37]).

Книга адресована в первую очередь молодому поколению разработчиков. Цель книги – предотвращение разрыва «связи времён», сохранение у инженеров исторической памяти. С точки зрения авторов, относящихся к поколению, сложившемуся в советское время, особо актуальна передача накопленного опыта в отсутствие среднего поколения, выбывшего из созидательной сферы космической радиоэлектроники из-за краха СССР. Мы, авторы, люди старшего поколения, упомянутую связь времён понимаем как идейное, хотя и не технологическое, единство современного космического телевидения с исторически первым, ведущим отсчёт от первого королёвского ТЗ. Конечно, современная молодёжь тяготеет к использованию «мудрости от гугла», не обременяя собственной памяти, но нужен материал, хотя и не являющийся учебным пособием, но дающий опору в виде великого прошлого, технологичного настоящего и обозримого будущего, достойного вложения души и времени сегодняшней молодёжи. В частности,

материалы книги используются в учебном процессе на базовой кафедре Видеоинформационных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ» при АО «НИИ телевидения».

Перед космическим телевидением стоят задачи (обеспеченные интеллектуальными ресурсами российских учёных и инженеров), без решения которых космонавтика не сможет обойтись. Среди них главное – повышение количества и качества видеоинформации, включающие увеличение пространственной и временной разрешающей способности, освоение всё более широкого диапазона длин волн, радикальное расширение динамического диапазона сигналов и повышение контрастной чувствительности, повышение точности измерения координат объектов для слежения за ними и для ориентации космических аппаратов и быстродействия, а также срока эксплуатации аппаратуры на борту российских оборонных, землепользовательских и научных космических аппаратов. Любой вклад в решение этих задач представляется актуальным, в силу чего авторы (выступая единым фронтом в практике космического телевидения, в теоретических вопросах часто ведущие жаркие дискуссии) и отважились на издание этой книги.

Авторы выражают признательность рецензентам д. т. н. Ю. С. Сагдуллаеву и д. т. н. Д. В. Кириченко за весьма полезные советы, и всем, чьи работы влились в общее русло космического телевидения – нашим смежникам: ЦНИИ «Электрон», АО «ЛОМО», ФГУП «ЦЭНКИ», ООО «Юник Ай Сиз», СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ВКА им. А. Ф. Можайского: д. ф.-м. н. В. Г. Иванову, к. т. н. А. А. Каменеву; ГАО РАН: д. ф.-м. н. А. В. Девяткину, к. ф.-м. н. М. С. Чубею; сотрудникам АО «НИИ телевидения», особенно: теоретикам д. т. н. С. И. Ханкову, д. т. н. А. А. Устинову, д. т. н. Ш. С. Фахми и практикам к. т. н. Вад. А. Иванову, к. т. н. А. И. Зубареву, к. т. н. В. С. Ковальчуку, к. т. н. П. С. Баранову, О. И. Семашкину, А. В. Климову, С. М. Любинскому, А. В. Галахову Ю. П. Гульгяеву, С. В. Лемешеву, Д. И. Сашину, к. т. н. А. В. Морозову, к. т. н. А. А. Чиркуновой.

Отзывы на книгу просим направлять по адресу niitv@niitv.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Изменение технологического уклада человечества 100 лет назад отразилось в том, что было предложено (академик В. И. Вернадский приписывает это А. Бергсону) называть наш вид *homo sapiens faber* (*faber* дословно – кузнец), что обычно переводят с латыни как «человек разумный, делающий орудия». Сейчас настало время сказать, что мы доросли до того, что стали «человеком разумным, делающим приборы» – уже не назовёшь орудиями миллиарды устройств мобильной связи, спутники ретрансляции телевидения и зондирования Земли, квантовые компьютеры и коллаидеры. Всё это – самые новые технологии приборостроения.

Поэтому огромное число научных и популярных изданий посвящены новым технологиям. Но не менее важно рассмотрение не только технологий, но и теорий и их взаимодействия. Это взаимодействие и отличие ролей проявляется в том, что теории должны играть роль руководителя, а технологии – исполнителя. При этом, как учил писатель М. Л. Анчаров, *«Труд действительно создал человека, но труд не по обработке камня, а по обработке его образа. То есть физическому труду умственный труд предшествует»*. Значит теория должна предшествовать практике. Не случайно Станислав Лем в книге «Сумма технологии», отмечая глубинные различия методов в науке и технологии, предсказывал в будущем устранение противоречий между ними. Иногда складываются ситуации, когда теории значительно опережают возможности существующих технологий, иногда – наоборот. Например, идеи К. Э. Циолковского значительно опередили рождение космонавтики при лидерстве С. П. Королёва (ситуация опережения теории), а полвека назад Норберт Винер, один из творцов теории информации, утверждал, что в области радиоэлектроники уже многие знают «как делать», но не многие знают, «что делать» (ситуация отставания теории).

В современной радиоэлектронике и космическом телевидении в частности, – одной их самых высокотехнологичных отраслей – сложилась не простая ситуация, связанная с развивающимся вторым этапом твёрдотельной революции, состоящим в переходе от приборов с зарядовой связью к КМОП фотоприёмным приборам. Эта технология хорошо отработана в интересах компьютерной и

связной техники, и постоянно совершенствуется путём улучшения норм точности и увеличения числа компонентов на единицу площади. Однако использование *рукотворных кристаллов* (процессоров, программируемых логических матриц, памяти) для развития телевизионной техники мало, и куда следует двигаться – должна подсказывать теория, в первую очередь теория информации. На современном этапе космического телевидения востребованы не только увеличение количества и качества видеoinформации, доставляемой из космоса, но и *новые принципы*, обеспечивающие этот неуклонный рост.

Космическое телевидение как предчувствие

Выдающиеся русские люди, занимаясь техникой, часто обращали свой взор к космосу. Так, создатель электронного телевидения В. К. Зворыкин в 1954 г. (за три года до запуска С. П. Королёвым первого спутника) заканчивает книгу «Телевидение» словами: *«Наконец, предположим, что главные проблемы межпланетных путешествий уже решены и специальный корабль, который сможет благополучно достичь поверхности Луны, уже сконструирован. Несомненно, что такой корабль будет послан в первый полёт без человека-наблюдателя на борту. Также несомненно, что в числе многих приборов, установленных на нём, для того, чтобы передавать информацию о ходе этого путешествия, важнейшую роль будут играть телевизионные камеры. Увидеть впервые Луну и другие планеты с близкого расстояния мы, несомненно, сможем глазами телевидения, которое откроет нам виды новых миров»*. Более того, мысли о космосе были среди побудительных мотивов В. К. Зворыкина с самого начала его работ над проблемой электронного телевидения. О своей работе в Петербургском технологическом институте в 1910-х гг. впоследствии он вспоминал: *«Особого интереса электронное телевидение в институте не вызывало. Мне говорили, что я пытаюсь заменить человеческий глаз. Я же спросил, в свою очередь: а вы можете увидеть своими глазами обратную сторону Луны?»*. Представляется весьма символичным, что Зворыкин изобрёл иконоскоп (первенец электронного телевидения, впервые реализовавший минимально необходимую для вещания чёткость в 300 строк) в том же 1933 г., когда С. П. Королёв запустил свою первую ракету в ГИРДе (Группа изучения реактивного движения). Именно с этой даты ведётся отсчёт полновесных практических

работ по телевидению и ракетной технике, которые впоследствии объединились, породив космическое телевидение.

Соединение мечты о космосе с телевидением, вслед глубоко чтимым им Циолковскому и Звoryкину, осуществил основоположник советской фантастики Александр Романович Беляев, которого Циолковский назвал «наш советский Жюль Верн». В 1931–1942 годах Александр Беляев жил в Ленинграде, где написал ряд ключевых для будущей техники телевидения романов. «Прыжок в ничто» (1933), в котором под впечатлением от трудов Циолковского предсказал телевизионную связь Земля – космический аппарат: *«организовать не только двустороннюю радио-телефонную связь Земля – "ковчег", но и установить на "ковчеге" супертелевизор, дающий возможность пассажирам видеть всё происходящее в любом уголке Земли ... телевизионные радиоустановки ... будут шифром передавать радиоизображения на станцию, транслирующую их "ковчегу"»*. В то же время он написал романы «Звезда КЭЦ», в котором предсказал долговременные обитаемые космические станции, и «Чудесное око» (1935), в котором описал подводное телевидение. Нацеленность нашего народа на *реализацию мечты* видна не только из слов «Марша энтузиастов» *«Мы рождены, чтоб сказку сделать былью»*, но и из того факта, что Всесоюзный Научно-исследовательский институт телевидения был создан в том же 1935 году, когда Александр Беляев в своём романе написал «Если научно-исследовательские учреждения помогут нам и дадут техническое оснащение...». Здесь же, в нашем городе, в 1923 году Алексей Толстой написал роман «Аэлита» о полёте на Марс. И даже «назначил на роль космодрома» дом на набережной реки Ждановки, где одно время размещалась лаборатория ГИРД, совсем близко от нынешней Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. Весьма впечатляет, что придуманный А. Толстым полёт на Марс из находившегося в разрухе Петрограда по духу весьма близок к подвигу советского народа в 1950-е годы, прорвавшегося в космос, едва восстановив хозяйство после военной разрухи.

И работая в ГИРДе, и позже, в Академии наук (в начале 1950-х годов) С. П. Королёв пропагандировал идею запуска искусственного спутника земли, подчёркивая, что *ракета, запущенная в космос без радиотелевизионной аппаратуры подобна камню, брошенному из средневековой пращи*. Он знал, что телевидение будет работать в космосе и для помощи космонавтам, и для наблюдения Земли в интересах метеорологии, геологии, обороны.

Весьма примечательно, что три ключевые для космического телевидения предпосылки созданы русскими людьми в одном и том же 1933 году: пророческий роман Александра Беляева «Прыжок в ничто», запуск С. П. Королёвым первой ракеты в ГИРДе и создание В. К. Зворыкиным электронного телевидения (рис. В.1).

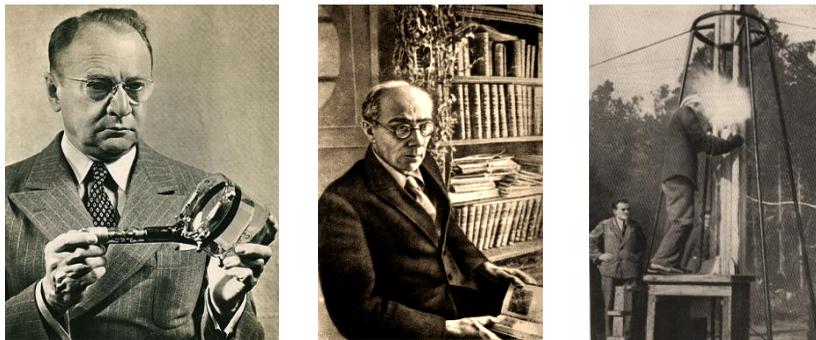


Рис. В.1. 1933 год: В. К. Зворыкин, А. Р. Беляев, С. П. Королёв

Королёвское космическое телевидение

Прогнозы и мечты В. К. Зворыкина о телевизионном взгляде на обратную сторону Луны были воплощены в реальность усилиями наших соотечественников, ведомых С. П. Королёвым. Впервые в прессе он заявил о Луне как близкой цели в декабре 1957 г. [2, с. 393], и для реализации этой идеи инициирует издание Постановления СМ СССР № 343-166 от 20.03.58, изложив технические подробности в работе «О программе исследования Луны» [2, с. 400–404]. Роль Луны в жизни отечественной космонавтики и самого Королёва видна даже из того, что большая карта Луны (один из очень немногих «космических» признаков) висела дома у С. П. Королёва (ныне дом-музей). Весьма показательны слова С. П. Королёва из письма жене [44]: *«Мне Выпало великое человеческое счастье трудиться в этом большом увлекательном деле – редкое для человека счастье! Вот и лирики немного, вероятно, русский человек без этого не может»*. И хотя «Поэзия жизни С. П. Королёва» [43] имеет много примеров, эти строки весьма показательны датой их написания – 1 октября 1959 г., т. е. во время непосредственной подготовки на Байконуре запуска космического аппарата «Луна-3» с телевизионной аппаратурой «Енисей» для наблюдения обратной стороны Луны. Это показывает,

какое большое значение для Королёва имело рождение космического телевидения. Конечно, не только для него, но и для всей страны, всех участников проекта, в том числе и для сотрудников Всесоюзного НИИ Телевидения в Ленинграде (ныне АО «НИИ телевидения»). В память об этом событии (запуск – 4 октября 1959 г., 7 октября – сеанс наблюдения и передачи) на стене НИИ телевидения установлена мемориальная доска (см. форзац).

Говоря о роли личности в истории, следует избегать крайностей и ошибки преувеличения значения роли лидера, от которой предостерегал С. П. Королёв [4]. Но и недооценивать эту роль нельзя. Конечно, лидеров создания космической техники было много, и нельзя не упомянуть о роли М. В. Келдыша в оформлении замысла рождения космического телевидения, который в 1958 г. в письме Королёву [4] изложил вариант запуска ракеты на Луну: *«Облёт Луны с фотографированием её обратной стороны и передачей изображения на Землю. Передачу на Землю предлагается осуществить с помощью телевизионной аппаратуры при сближении ракеты с Землей. Возвращение на Землю материалов наблюдений является более трудной задачей, её решение может мыслиться только в дальнейшем»*. Эта цитата показывает, что М. В. Келдыш принимал космическое телевидение как полезную, но промежуточную меру. Совершенно иной взгляд на космическое телевидение был у Королёва. В его изложении космическое телевидение занимает важное место, хотя и не строго фиксированное. Так, при описании в 1964 г. проекта автоматической станции для первой посадки на Луну (первая в мире мягкая посадка на Луну и передача телевизионного сигнала с «Луны-9» – февраль 1966 г. [2, с. 515]) С. П. Королёв относит телевизионную систему, обеспечивающую панорамную развёртку и круговой обзор местности, к научной аппаратуре. Но при описании в том же году автоматических межпланетных станций для исследования Марса и Венеры включает телевизионную систему не в раздел научной аппаратуры среди других 25 приборов, а в важнейший раздел «Конструкция автоматических межпланетных станций» [2, с. 504]. Это значит, что для Королёва телевидение – часть ракеты (космического аппарата), встроенная в неё система, обеспечивающая и

реализацию цели запуска, и жизнеобеспечение ракеты, а вся *ракета с телевидением – новый тип энергоинформационной машины*. Отдавая должное вкладу М. В. Келдыша в становление космического телевидения (в частности, он утвердил ТЗ второго этапа работ по теме «ОД»), нельзя не заметить, что, выдавая *первое* техническое задание НИИ-380 (ВНИИТу) на разработку космического телевидения, С. П. Королёв счёл не обязательным подписывать его у Келдыша, хотя его фамилию (как председателя спецсекции при президиуме АН СССР по объекту «ОД») и напечатали на титульном листе. В первом ТЗ на космическое телевидение необходимо обратить внимание на два момента, показывающих смелость и широту фантазии С. П. Королёва. Первое – что *ТЗ подписано более чем за год до запуска первого спутника*. Дата подписания Королёвым ТЗ 22 августа 1956 года интересна ещё и тем, что он значится в нём как Главный конструктор НИИ-88, хотя за неделю до подписания уже выделился из НИИ-88 в отдельное ОКБ-1 [46], и заранее планировал рождение космического телевидения для своей самостоятельной «фирмы». Выдавая ТЗ (рис. В. 2), С. П. Королёв воспользовался формальным наличием инициированного им Постановления СМ СССР №149-88 от 30.01.56, посвящённого будущему первому спутнику.

Важно, что в этом постановлении речь шла о простейшем неориентированном спутнике, и о космическом телевидении не могло быть речи. Потому-то и удивительна инициатива С. П. Королёва по закладке фундамента *двух направлений космонавтики и, соответственно, космического телевидения, – пилотируемой и беспилотной*. Это значит, что образ будущих космических аппаратов, оснащённых телевизионными системами, был у Королёва уже в 1956 г. Он уже тогда знал, что пилотируемые корабли будут иметь скромные габариты кабины космонавта и его телевизионной камере (ТВ камере) нужно будет «разглядывать в упор». В ТЗ написано (рис. В. 3), что *«телевизионная камера должна обозревать объём 0,5×0,5×0,3 м (или 0,7×0,7×0,4 м) с расстояния 0,4...0,5 м»*, и что телевизионная камера должна обозревать из космоса *«поверхность Земли с высоты 200...500 км»*.

УТВЕРЖДАЮ
ГЛАВНЫЙ КОНСТРУКТОР
НИИ-88 МОП
В. В. Королев (КОРОЛЕВ)
" 17 " _____ 1956г.

УТВЕРЖДАЮ
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР
ВНИИ-ЭЭО МЭП
И. В. Захаров (ЗАХАРОВ)
" 4 " июль 1956г.

СОГЛАСОВАНО
ПРЕДСЕДАТЕЛЬ СПЕЦСЕДИИ ПРИ
ПРЕСДИУМЕ АН СССР по ОБЪЕКТУ "ОД"
академик _____ (КЕЛДЫШ)
" " _____ 1956г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

на проведение научно-исследовательской работы по исследованию возможности создания и разработки телевизионного оборудования для объекта "ОД".

Настоящее ТЗ составлено на первый этап работ, оканчивающихся в I-м квартале 1957 года.

I. Цель работы

Настоящая работа имеет целью определение возможности создания телевизионного оборудования для объекта "ОД" и в случае положительного решения, изготовление макета телевизионной аппаратуры и проведение с ним экспериментальных испытаний в условиях близких к реальным.

II. Содержание работы

В процессе выполнения работ по теме на первом этапе должны быть исследованы следующие вопросы:

I. Возможность создания телевизионной аппаратуры, отвечающей требованиям:

- а) малогабаритности,
- б) экономичности,

Рис. В.2. Титульный лист первого ТЗ на космическое телевизионное оборудование

2. Телевизионная камера должна обозрывать:

- а) объем $0,5 \times 0,5 \times 0,3$ м (или $0,7 \times 0,7 \times 0,4$ м) с расстояния $0,4 \pm 0,5$ м;
- б) поверхность земли с высоты 200 ± 500 км.

Рис. В.3. Фрагмент первого ТЗ на космическое телевизионное оборудование

И совсем не случайно, что первое, королёвское ТЗ на космическое телевидение, кстати, весьма компактное (всего 7 страниц), в отличие от современных ТЗ, вообще не содержало указаний на параметры разложения. Даже когда С. П. Королёва предупредили, что на протяжении всего космического полёта вокруг Земли можно передать на Землю изображения обитаемого отсека (сначала речь шла о собаках) только через узкополосный радиоканал (телевизионный сигнал с разложением на 100 строк при 10 кадрах в секунду), он сказал: «*Нам хотя бы одним глазком туда к ним заглянуть*». Здесь уже работал формализованный значительно позже принцип векторного характера информации, имеющей не только количество, но и качество, и, главное, *цель*.

Инициатором создания космического телевидения был С. П. Королёв, придававший ему большое значение. Ещё до полёта первого космонавта [2, с. 424] он прогнозировал появление искусственных спутников Земли для ретрансляции радиопередач и телевидения, для службы погоды, для астрономических наблюдений. Не случайно в работе «Основные положения для разработки и подготовки космического корабля «Восток-В» (1960 г.) [2, с. 416] после первого пункта раздела «Состав объекта и основные особенности систем», посвящённого системе ориентации (всего 11 пунктов), второй пункт гласит: «Тормозная двигательная установка, система терморегулирования, *система космовидения* с двумя телевизионными камерами, телеметрическая система контроля орбиты <...> создаются на основе систем объекта "Восток-А"». Позже, в работе «О возможности использования корабля «Восток» для экспериментальных исследований по перспективным проблемам космонавтики» (1963) [2, с. 457] в разделе «Основные задачи, решаемые кораблями серии 1963–1964 гг.» С. П. Королёв пишет: «4. Исследование и отработка методов и элементов прикладного применения пилотируемых космических кораблей, в том числе: наблюдение космонавтами за космическими объектами (последняя ступень ракеты-носителя, Луна и др.) с помощью телевизионных средств в интересах отработки вопросов стыковки в космосе; наблюдение земной поверхности с помощью телевизионных средств с передачей телевизионного изображения как космонавту, так и на Землю; наблюдение за световыми сигналами, подаваемыми с Земли. Лидером *разработки* систем космического телевидения на начальном этапе был ВНИИ, а в нём – П. Ф. Брацлавец, заслуженно называемый создателем космического телевидения. На его счету главные

мировые рекорды космического телевидения эпохи С. П. Королёва – обратная сторона Луны, передача телевизионного сигнала с пилотируемых кораблей, изображение всей Земли с высокоорбитального КА «Молния». Этап становления космического телевидения за его первое десятилетие 1956–1966 гг. кроме самой первой системы Луна-3 (без учёта неудачных пусков к Марсу и Венере – эти замыслы С. П. Королёва были реализованы позже) включает создание:

- системы передачи с обитаемых спутников и пилотируемых космических кораблей (сначала узкополосной – «Восток», 1960; «Восток-1», «Восток-2», 1961). Они стали первыми в мире системами, которые реализовали замысел С. П. Королёва, изложенный в первом ТЗ от 1956 г. о наблюдении космонавтов в полёте. Музей НИИ телевидения свято хранит ТВ камеру, которая (пусть и с весьма скромным качеством из-за малой доступной пропускной способности канала связи) передавала из космоса изображение Ю. А. Гагарина. Эту ТВ камеру как свой боевой трофей П. Ф. Брацлавец доставил в музей ВНИИТа прямо с места приземления космического корабля [39], [40];

- системы космовидения с вещательной кадровой частотой («Восток-3»–«Восток-6», 1962–1963; «Восход», 1964, «Восход-2», 1965,) [1], [39], [40];

- метеорологической телевизионной системы I поколения; период разработки и изготовления 1958–1964 гг., первый аппарат типа «Метеор» запущен в августе 1964 г на комическом аппарате «Космос-44» [1], [39]–[41], [46]. *Она стала первой отечественной системой, которая реализовала замысел С. П. Королёва, изложенный в первом ТЗ от 1956 г. о наблюдении Земли из Космоса с орбит высотой порядка 500 км.*

- космического аппарата «Зонд-3» (1965). С. П. Королёв поставил также задачу создания лунного глобуса, для чего потребовалось устранить «белые пятна», оставшиеся после эпохальной операции 1959 г. «Зонд-3» (до полётов американских КА «Лунар орбитер») завершил подробное наблюдение обратной стороны Луны (лидерами разработки были Ю. К. Ходарев и А. С. Селиванов) [1], [20].

- космического аппарата Луна-9 (1966), осуществившего передачу панорамы лунной поверхности после мягкой посадки на Луну (лидерами разработки были Ю. К. Ходарев и А. С. Селиванов) [1], [20].

- космического аппарата Молния-1 (1966). ТВ камеры на высокоорбитальном связном спутнике устанавливались по прямому указанию С. П. Королёва (главный конструктор П. Ф. Брацлавец). Именно ТВ камеры с КА «Молния» *впервые в мире реализовали замысел С. П. Королёва о «телевизионном взгляде сразу на всю Землю»* [1], [39], [40].

Космические достижения нашей страны влияли и влияют на русское самосознание и в плане приобщения к космизму, и в плане бывшего, а значит и *возможного будущего мирового лидерства России*. Не случайно опрос общественного мнения о выборе даты для «Дня национальной славы России» показал, что «претендентов» всего два: День космонавтики и День Победы в Великой Отечественной войне. Эти два дня называют рядом не случайно. Наш народ победил фашизм и поверил в себя, в реальность своей *мечты о космосе*. И советские люди, и по нынешним меркам, и по тогдашним американским меркам – *достаточно бедные* – реализовали давнишнюю мечту о выходе в космос, «взятии его штурмом». При этом американцам непонятно, почему нас так тянет в космос. Да для нас доллар – не цель: даже сегодня наша страна, являясь лидером по количеству запусков космических аппаратов, осуществляет всего 0,6% пусков на коммерческой основе, заботясь в первую очередь о собственном хозяйстве и обороне. Пафос бескорыстного освоения космоса нашим народом прекрасно отражён на памятнике покорителям космоса в Москве:

*И наши тем награждены усилъя,
что поборов бесправие и тьму,
мы отковали пламенные крылья
своей стране и веку своему!*

Говоря о влиянии С. П. Королёва на людей, на их самосознание сначала нужно разделить людей на соратников и «публику», затем на современников и потомков. Влияние на соратников определялось тем, что энтузиазм уже был массовым, и Королёв «просто» конкретизировал и усиливал идеи «всё выше, и выше, и выше» и «мы рождены, чтоб сказку сделать былью», уже овладевшие массами. Влияние на остальное современное ему человечество можно выразить словом «потрясение». Первый искусственный спутник Земли, телевизионная передача обратной стороны Луны, первый космонавт, первое изображение Земли с высокой орбиты – все эти королёвские достижения радикально изменили самосознание людей. Это поняли люди всей Земли и «уже нельзя отрицать, что в нашем сознании произошёл ощутимый

поворот» [47]. «Выразительное изображение нашего родного космического дома, сделанное из космоса, коренным образом изменило представление о месте человека во Вселенной. Он <снимок Земли> ещё более убеждает нас в правоте слов, которые философы и астрономы твердили со времён Коперника: "Песчинка – мир, а жизнь – мгновенье...". Далее Дариус пересказывает прогноз о том, что «Как только удастся сфотографировать Землю из космоса, мы перейдём в новое эмоциональное состояние... Пусть горькое одиночество Земли осознает каждый независимо от его национальности и убеждений – и новая идея поистине исторического масштаба охватит человечество» [47]. А когда этот прогноз сбылся, то Дж. Дариус, игнорируя наш, по замыслу – королёвский, результат телевизионного наблюдения полного диска Земли с высоты более 40 тысяч километров в 1966 году, пишет, что первые снимки такого рода сделаны американцами в 1967 году, проявляя типичное *принципиальное неведение результатов врагов*.

Затем он отмечает, что «Нельзя не заметить, как все разом всерьёз забеспокоились о защите окружающей среды. Откуда взялась эта идея? От биологов и экологов? Но они уже много лет говорили об этом. Раньше, однако, их слова не попадали в цель. Видимо, что-то другое заставило людей теперь понять, сколь драгоценен и неповторим этот мир. И неслучайно это понимание пришло как раз в тот момент, когда человек сделал первые шаги в космос» [47]. Под влиянием этих космических побед теоретик космического телевидения Л. И. Хромов даже высказывал идею проведения заседаний ООН на Луне именно с целью овладения образом хрупкой и беззащитной Земли правителями всех стран. Это, по его мнению, должно было уменьшить их агрессивность и усилить чувство любви к Земле и её населению, несовместимое со стяжательством богатств Земли в своё единоличное пользование.

Именно Королёв – Колумб космоса. Это сравнение уместно не только в силу огромной значимости прорыва в космос, но и потому, что ему, так же, как и Христофору Колумбу, надо было сначала *поверить в достижимость идеи*, потом убедить в этом соратников, а потом и достичь поставленной цели. Именно Королёв открыл космос для массового сознания, заставил людей согласовывать своё мировоззрение с космосом. Причём не так, как США, для которых типично планирование не только научных исследований в космосе, но и бомбардировок ядра кометы или Луны, их познание космоса часто идёт через бомбу, через образ бомбы как орудия власти. Российский космос, конечно, имеет оборонный сегмент, но лишь как

меру противостояния земному злу. С. П. Королёв даже утверждал [2]: *«Космос для науки, только для мирных целей, на благо человека, неумолимо разгадывающего сокровенные тайны природы, – вот тот путь, по которому развиваются советские космические исследования».*

Можно говорить, что космическое телевидение создал советский народ (что и сделал Хрущёв, отказавшись от предложенной Королёву Нобелевской премии), можно и должно выделить отдельных лидеров создания этой техники. Все эти создатели космических телевизионных систем отличались особо ценным С. П. Королёвым качеством – удивительно большой скоростью создания систем. Сейчас, через 60 лет со дня выдачи С. П. Королёвым первого ТЗ на систему космического телевидения, совершенно ясно: период становления этой отрасли техники (высшей формы техники связи), охватывающий десятилетие 1956–1966 гг., определяется идеями, инициативой и волей С. П. Королёва – истинного Отца космического телевидения. Поэтому и всё созданное в космическом телевидении за его первое десятилетие можно назвать королёвским космическим телевидением.

Тенденции космического телевидения

Начальный, королёвский этап развития космонавтики назван академиком Раушенбахом спортивно-романтическим. За ним последовал этап массовой атаки на космос, в полном соответствии с определением С. Лема – «Героическая атака на природу – девиз человечества». Про этот этап следует сказать, что даже у знаменитого фантаста Александра Беляева не хватило фантазии на прогноз на треть века, потому что рост знаний за это время был впечатляющим. Это отразилось в первой крупной работе [1], объединившей понятия телевидения и космоса, обобщившей имевшийся во ВНИИ телевидения опыт проектирования и эксплуатации космических телевизионных систем различного назначения.

Конечно, системы космического телевидения создавались многими отечественными предприятиями, среди которых лидирующее положение занимали НПО космического приборостроения (ныне АО «Российские космические системы»), ВНИИ телевидения и Институт космических исследований (ИКИ РАН), ЛОМО, КМЗ, ВНИИЭМ, РКЦ «Прогресс». В НПО космического приборостроения были созданы телевизионные системы, обеспечившие получение панорам Луны, Марса, Венеры, работу луноходов, исследование природных ресурсов Земли, наблюдения КА с Земли, и др. [20], [48]–[50]. Во ВНИИ телевидения были созданы системы наблюдения:

обратной стороны Луны, метеорологические системы для низкоорбитальных и геостационарных КА, системы обнаружения стартов ракет и стыковки КА, внутриотсечное телевидение обитаемых КА, в том числе «Мир», «Буран» и МКС, наблюдения КА с Земли [1], [39], [40]. В ИКИ РАН были созданы космические системы наблюдения Земли, Марса и его спутников, кометы Галлея, телевизионные системы астроориентации и др. [21], [22].

Невозможно перечислить все публикации, посвящённые полученным из космоса телевизионным изображениям. Особенности эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры, связанные с влиянием космического пространства, подробно рассмотрены в [24]. Достижения и проблемы наблюдения Земли из космоса хорошо освещены, космическое телевидение работает на метеорологию [52], [53], экологический мониторинг [54]–[56], геологические и географические исследования – [54], [55], контроль поверхности Земли в оборонных целях – [15], [23], [38], обнаружение ракет из космоса [6], [8], [26], внеатмосферную астрономию [59], [60], наблюдения небесных тел солнечной системы [20]–[22], наблюдения КА с Земли – [8], [61], наблюдения КА с борта другого КА (например, для обеспечения стыковки аппаратов) – [1], [18], [19], [62]–[64], передачу цифрового телевизионного сигнала с помощью спутниковой ретрансляции [17], [58]. Кроме того, практически на всех космических аппаратах располагаются датчики астроориентации, обеспечивающие наведение и стабилизацию визирной оси целевой телевизионной аппаратуры [9], [10], [64]–[66]. Общей чертой подавляющего большинства типов указанных телевизионных систем является то, что их пользователь (в отличие от пользователя телевизионного вещания) участвует в формировании облика систем с самого начального этапа их проектирования.

В отличие от первой спортивно-романтической фазы современная космонавтика приобретает две, казалось бы, противоположные черты: *космономики* (космос + экономика = прогноз конверсионного характера космонавтики [28]) и нарастающего значения её оборонного сегмента.

При обсуждении Военной доктрины РФ неоднократно подчёркивалось решающее значение воздушно-космической обороны и средств космической разведки, нацеленной как на контроль Земли из космоса, так и на контроль космоса с помощью наземных и космических средств: *«В Военной доктрине нужно выдвинуть требование о более решительной концентрации научных сил,*

финансовых и материально-технических средств для осуществления прорыва в области элементной базы, перспективных технологий для создания средств связи, обнаружения, наведения, автоматизации, управления, РЭБ, информатизации. Особое значение имеет создание средств обнаружения воздушных целей на новых принципах. Нужно не просто провозглашение приоритетов в этой области, а концентрация научных сил и материальных средств, осуществляемая с таким же решительным подходом, как это было сделано сразу после Великой Отечественной войны при создании ракетно-ядерного оружия» [238].

Принципиальное отличие оборонных космических систем от научных астрономических – требуемое высокое быстродействие и надёжность. Не случайно в США в рамках Стратегической оборонной инициативы (СОИ) многие миллиарды долларов были направлены на достижение технологического превосходства в области фотоприёмников инфракрасного (ИК) диапазона и радиационно-стойкой электронной компонентной базы (ЭКБ) для вычислительной и связанной аппаратуры космического базирования. Важность быстродействия, требуемого от космических систем, иллюстрируется мнением разработчиков СОИ: экономия одной секунды эквивалентна экономии миллиарда долларов. К сожалению, потребность аналогичного развития отечественной ЭКБ была недооценена, что породило «асимметричный ответ», то есть чрезмерный акцент не на информационные системы, а на энергетические аспекты наступательного оружия [15]. Конечно, крупные видеоинформационные системы, в том числе космические, создавались [5], [8], [26], но обеспечение их ЭКБ, в первую очередь фотоприёмниками, оставляло желать лучшего.

В наиболее известных конверсионных направлениях космонавтики космическое телевидение (мониторинг в видимом диапазоне длин волн) занимает заметное место. В системах мониторинга широко распространены пролётные (с развёрткой за счёт движения спутника по орбите) системы дистанционного зондирования Земли со строчными фотоприёмниками (включая вариант с временной задержкой и накоплением, ВЗН) [30]–[32], имеющие большой рынок и потенциал для развития в смысле космономики.

Для всех направлений космонавтики важно постоянное наращивание не только количества получаемой информации, но и её качества. Конечно, современный уровень развития телевидения, благодаря новым информационным технологиям, значительно отличается от того, который существовал при запуске первого

космонавта, но академик Черток считал, что *«мы получаем из космоса с помощью космических аппаратов огромное количество информации, с которой, как правило, Земля не справляется, то есть не успевает её обрабатывать»*.

Одним из проявлений наращивания количества и качества информации является постоянный рост разрешения по Земле и ширины полосы захвата в системах ДЗЗ [30] и стимулированный этой тенденцией рост разрешающей способности твёрдотельных фотоприёмников [32]–[38], будь то матричные фотоприёмники, линейные или специально созданные для космических исследований приборы ВЗН. Тенденция наращивания разрешения космических снимков соответствует стратегической цели дистанционного зондирования Земли из космоса – видеть всю Землю во всех окнах прозрачности атмосферы с разрешением лучше 1 метра с периодичностью не реже 1 раз в сутки [30], [67]–[69].

Такая периодичность обновления видеoinформации во многих приложениях стратегической разведки приемлема, но при разведке на театрах военных действий она явно недостаточна, так как в этом случае необходимо обнаружение подвижных объектов. Попытка возложить задачу селекции движущихся целей на ОЭА с линейными ПЗС фотоприёмниками или многолинейными ПЗС с режимом ВЗН (используя пару разнесённых вдоль направления полёта фотоприёмников) хотя и реализует идею выделения на изображении подвижных объектов, но позволяет получить на одном витке КА всего два кадра, смещённых на время порядка 1 секунды, что недостаточно для определения параметров движения наземных целей. Радикальным решением задачи селекции движущихся целей (СДЦ) при контроле театров военных действий является использование группировок «наноспутников» с матричными фотоприёмниками, обеспечивающих передачу видеoinформации непосредственно на поле боя без какой-либо ретрансляции [38].

В будущем, для выполнения части задач ДЗЗ на смену тяжёлым спутникам придут малые и сверхмалые космические аппараты [11], высоко технологичные, быстро проектируемые, недорогие. В условиях неуклонной микроминиатюризации радиоэлектронной ЭКБ, уменьшение массы и стоимости аппаратов ДЗЗ – тенденция объективная и естественная. Она остановится, когда габариты «упрутятся» в физические ограничения по характеристикам оптики.

Для космического телевидения для систем как видимого, так и ИК диапазона характерна тенденция к использованию фотопри-

ёмников большой площади, обусловленная стремлением к достижению большой чувствительности и максимально возможных углов зрения. Для этого часто используются сборки матриц [27], [70].

Рост количества добываемой из космоса информации проявляется, в частности, в том, что многие системы космического телевидения, начиная с его рождения в 1959 г. при передаче изображения обратной стороны Луны, используют бортовые запоминающие устройства для передачи телевизионных сигналов не непосредственно во время съёмки, а при достижении оптимальных условий связи по условиям прямой видимости и/или дальности передачи. При этом объём памяти нарастает в соответствии с технологическими возможностями. И хотя закон Мура о росте сложности интегральных схем относится к твёрдотельной технологии, видно, что подобный закон охватывает и более ранние типы технологий – запоминание на фотоплёнке и магнитной ленте (рис. В. 4).

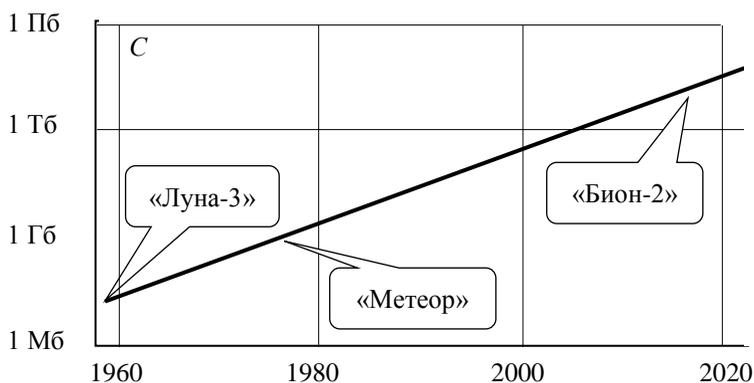


Рис. В.4. Рост объёма бортовой памяти космических систем

Современные теоретические исследования и практические разработки ведут от малокадрового телевидения к *когнитивному*, от адаптации к *изодинамическим* системам, для которых характерна перестройка всех параметров (чёткость, кадровая частота, полоса частот радиоканала и методы модуляции в разных поддиапазонах). Цифровое телевидение становится по настоящему цифровым только в космосе – начиная с матриц с цифровым пикселем с большой разрядностью. Именно космос актуализирует важность доминантной информации (назначая высокую цену потери информации) при существенном ограничении сложности бортовой системы – всё это и рассмотрено ниже.

Глава 1. МЕТОДОЛОГИЯ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

1.1. Философия космического телевидения

Практика космического телевидения начиналась при отставании теории, и книга [1] явилась важным шагом на пути предсказанного С. Лемом сближения теории и технологии. Но это кратковременное отставание теории космического телевидения от практики не означает, что у него не было своей методологии. Её ядром стало малокадровое телевидение, космическое телевидение вошло в жизнь как малокадровое [1], [20]. Идея малокадрового метода передачи телевизионных сигналов принадлежит Семёну Исидоровичу Катаеву (1904–1991), крупному советскому учёному, автору ряда изобретений передающих телевизионных трубок. Широко известны его идеи и результаты в области телевизионного вещания – это стандарт разложения на 625 строк, использование ИСЗ и Луны в качестве «носителя» ретрансляторов телевизионных сигналов. Однако его крупная идея, им же экспериментально проверенная, впоследствии получившая наименование «малокадрового телевидения», известна менее широко и нуждается в осмыслении и пропаганде. Сам С. И. Катаев (рис. 1.1.1), тогда работавший во ВГИТИСе и на кафедре телевидения Московского института связи (МЭИС), которой он заведовал почти полвека и которая сейчас носит его имя) назвал свою идею, рождённую в 1935 г. и зафиксированную в научно-технической печати в 1936 г., «методом передачи телевизионного изображения в узкой полосе частот» [71]. Позже эта идея получила более компактный термин «малокадровое телевидение», предложенный в 1958 г. Леонидом Иосифовичем Хромовым¹ (рис. 1.1.1) [72].

Когда все были потрясены достижением отечественной космонавтики, позволившей в 1959 г. заглянуть на невидимую с Земли сторону Луны, термин «малокадровое телевидение» был ещё очень молодым. Новый термин «малокадровое телевидение» должен был появиться для обозначения новой отрасли науки и

¹ Главный теоретик космического телевидения Л. И. Хромов – не только автор термина малокадровое телевидение, «золотого» правила малокадрового телевидения [74] и главное действующее лицо в трилогии по космическому телевидению [1], [33], [34], но и соавтор уравнения связи [78] и принципа доминантной информации [79].

техники, он должен был подчеркнуть её принципиальное отличие от вещания, и «обозначить отрицание» оценки своей роли как узкополосного суррогата вещания. Кроме того, рождение космического телевидения, начавшего эру глобальной информатизации, потребовало короткого термина вместо употреблённого С. И. Катаевым многословного термина.



Рис. 1.1.1. Теоретики космического телевидения
С. И. Катаев

Л. И. Хромов

Малокадровое телевидение родилось у С. И. Катаева как образ, соединив в себе черты трёх технических направлений:

- вещания на всю страну с помощью коротких волн,
- опыта передачи изображений малой чёткости (формируемых механической телевизионной системой),
- только что родившегося электронного телевидения, позволившего преодолеть порог чёткости в 300 строк, необходимый для вещания.

При этом вещание (передача кинофильмов и новостей) на всю страну было *целью*, а телевизионная техника, как раздел радиотехники, была средством. До эры искусственных спутников Земли было ещё далеко, и забота об информационном единстве нации требовала поиска хоть каких-нибудь перспектив. Радиотехники 1930-х годов прекрасно понимали, что для телевизионного вещания с хорошей чёткостью при высокой частоте кадров (при которой незаметны пульсации, или, в просторечии, «мелькания» с кадровой частотой) потребуется передача на ультракоротких волнах (УКВ). А это ставило серьёзную преграду на пути превращения телевидения в массовое явление. Поэтому С. И. Катаев писал

[71]: «Для того чтобы обслужить телевидением население Советского Союза, удалённое на сотни и тысячи километров от центров <...> остаётся лишь путь подыскания таких суррогатов нормального телевидения, которые не требуют столь широкой полосы частот и позволяют вести передачу телевидения не только на ультракоротких, но и на коротких, средних и даже длинных волнах».

И как же можно было выпутаться из этой сложной ситуации на тогдашнем уровне техники? Подчеркнём, что сегодняшняя микроэлектронно-компьютерная технология сжатия информации в те годы не только отсутствовала, но и не могла даже прогнозироваться: ведь не было даже намёков на транзистор или ЭВМ. На этом этапе развития радиосвязи С. И. Катаев методично разбирает возможности упрощения телевизионного сигнала [71], что на сегодняшнем языке может быть обозначено как поиски метода сжатия видеoinформации: «Одним из таких суррогатных разновидностей телевидения является унаследованная нами от младенческого периода развития телевизионной техники – передача с намеренно уменьшенной чёткостью, порядка 1200 элементов.

Однако, всякий, кто видел телевизионную картину с чёткостью 1200 элементов, скажет, что практический смысл такое телевидение может иметь лишь для передач весьма ограниченного числа объектов.

Второй суррогатной разновидностью телевидения могла бы явиться демонстрация кинофильмов, передаваемых с помощью длинноволновых раций на дальние расстояния, в течение промежутков времени в сотни раз более длительных, чем время самих демонстраций. <...>

Третья разновидность таит в себе принципиальную возможность значительного увеличения доходчивости до слушателя телевизионных передач радиовещательных программ, передаваемых с длинноволновых станций. По чёткости, т. е. по числу строк разложения, здесь также имеются не меньшие возможности, чем передачи телевидения на у.к.в., т. е. при этом способе возможно передавать телевизионную картину по радио с чёткостью 240 и более строк. Что же в таком случае пришлось принести в жертву общепризнанной истине, гласящей о невозможности передачи чёткого телевидения на той узкой полосе частот, с которой работают радиостанции вещательного диапазона? Пришлось поступиться частотой кадров».

Каких же результатов удаётся при этом достичь? Катаев отвечает [71]: *«В описываемой ниже системе, разработывавшейся в ВГИТИСе под руководством и по предложению автора, оказывается возможным снизить частоту кадров, без потери возможности зрительского восприятия картины, практически в любое число, например, в 100 раз».*

Что можно наблюдать с помощью такой телевизионной системы? Снова процитируем статью [71]: *«При такой передаче телезритель видит на экране приёмной трубки вместо непрерывно меняющегося изображения объекта лишь медленно чередующиеся, хотя и вполне чёткие неподвижные статичные картины, дающие представление о положениях объекта в отдельные чередующиеся, например, через каждые 3–5 секунд, моменты времени».*

Идея передачи телевидения в узкой полосе частот не нашла своего применения в вещании ни сразу, ни по прошествии десятилетий. Проблема охвата телевизионным вещанием с хорошей чёткостью при передаче сигналов на УКВ была решена, во-первых, с помощью строительства по всей стране большого числа передающих телецентров с высокими мачтами, обеспечивающими достаточно большой охват местности с высокой плотностью населения, и, во-вторых, освоением космоса и космической технологии ретрансляции телевидения на всю территорию страны. Поэтому можно сказать, что телевизионное вещание «произвело отрицание» передачи в узкой полосе частот, оставив себе лишь некоторое сокращение полосы в 5...6 раз, реализованное в цифровом телевидении, не претендуя на упомянутые Катаевым 100 раз.

Здесь важно подчеркнуть *различия вещательного телевидения и малокадрового телевидения*. Вещание – это строго *регламентированная стандартами* передача подвижных изображений, ориентированная на массового зрителя, для которого обязательна комфортность восприятия передаваемых образов, состоящая, в первую очередь, в отсутствии мелькания кадров, т. е. *иллюзия слитности изображений*. Малокадровое телевидение – это передача подвижных изображений, ориентированная на *адаптивное* согласование свойств источника, канала связи и получателя.

Космическое телевидение в понимании большинства – это телевизионное вещание через спутниковые ретрансляторы. Но телевидение и космос теснейшим образом связаны не только в деле распространения информации, но и в деле её рождения. В деле познания космоса вещательное телевидение уступило место малокадровому телевидению. Космическое телевидение востребовало

именно малокадровый метод, а не вещательный стандарт, который встал на службу в космосе позже, и далеко не везде. Очень показательно, что малокадровое телевидение вошло в жизнь человечества как космическое, а космическое телевидение родилось как малокадровое. Для выяснения причин этого необходимо охарактеризовать малокадровое телевидение, начиная с самого его зарождения и во всём его диалектическом взаимодействии, как с вещательным телевидением, так и с разворачивающимся освоением космоса [73].

Рождение космического телевидения как малокадрового обусловлено следующими причинами:

- необходимостью согласования новых типов источника, канала и получателя;
- особенностью источника – малой подвижностью изображения;
- особенностью канала – передача сигналов в узкой полосе частот из-за больших расстояний, требующих большой мощности радиопередатчика, возрастающей с увеличением полосы частот видеосигнала;
- особенностью получателя – приём видеoinформации об обратной стороне Луны (как и в большинстве появившихся после систем) осуществляли профессионалы-экспериментаторы, а не телезрители вещательной сети.

Узкая полоса частот космического малокадрового телевидения, характеризующая *передачу* информации, не могла не наложить своего отпечатка на реализацию самой системы, т. е. процесса *рождения* малокадрового сигнала. В космосе применяются малокадровые системы трёх различных классов, определяемых типом фотоприёмника: одноэлементный, строчный и кадровый. В одноэлементных системах развёртка осуществляется механически по двум осям (важный вариант – развёртка по одной из осей производится за счёт движения спутника по орбите). В строчных системах развёртка вдоль строки производится электронными методами, а поперёк – механически (чаще всего, так же, как и в одноэлементных – за счёт движения спутника по орбите). В кадровых (трубочных и матричных) системах развёртка изображения по обеим осям производится электронными методами. Кадровые системы имеют самую большую чувствительность и возможную, благодаря ей, высокую кадровую частоту, обеспечивающую высокую слитность передачи движения. Кадровые системы «подвергли отрицанию», т. е. вытеснили механические системы телевидения практически во всех наземных применениях и,

в частности, в телевизионном вещании. Однако космос востребовал важные достоинства механического сканирования (большой динамический диапазон световых сигналов, равномерность чувствительности, простоту построения многоспектральных систем) и ввёл его в арсенал средств космического телевидения, где оно трудилось при получении панорам Луны, Венеры и Марса [20], использовалось и используется в низкоорбитальных [23] [52] и геостационарных космических аппаратах [53]. Поэтому можно сказать, что на новом витке развития техносферы, наглядно показывая в действии закон диалектики, *космос возродил телевизионные системы с механическим сканированием*, которые «выразили ответное отрицание» системам с кадровым накоплением. В частности, в космических метеорологических системах кадровое накопление в настоящее время не используется, хотя попытки были. В такой малокадровой видиконной системе [1] после относительно кратковременной экспозиции требовалось накопленное изображение медленно считывать за время, пока КА переместится по орбите на расстояние, достаточное для того, чтобы следующий кадр существенно отличался от предыдущего. Однако трудности получения широкого угла зрения в кадровой системе (в которой сложно формировать наборное поле фотоприёмников) привели к тому, что выбор способа реализации накопления и развёртки зависит от того, что важнее – разрешающая способность по пространству или по времени.

В результате родилось эмпирическое *золотое правило малокадрового телевидения* [74]: *если нужны широкий угол зрения и большая разрешающая способность по местности, то следует применить сканирующую систему (строчную или одноэлементную); если нужна высокая чувствительность, то следует применить систему с кадровым накоплением*. Это правило достаточно устойчиво к развитию технологии фотоприёмников. Даже появление матриц ПЗС с очень большим числом элементов 10^7 не вытеснило линейные сканирующие системы, которые позволяют хотя и медленно, но формировать изображения с числом элементов более 10^8 (например, 12000×12000).

Вместе с тем методологически это правило претерпело изменение, и его сегодняшняя трактовка усиливает опору на понятие *слитности* [75]: *если высокая слитность изображения по полю важнее слитности во времени, то следует применить сканирующую систему, если важнее высокая слитность воспроизведения*

движения объектов, то следует применить систему с кадровым накоплением.

Поэтому важнейшей чертой малокадрового телевидения является свобода проектировщика в выборе методов реализации накопления и развёртки изображений, которая при разнообразии задач и ограничений на реализацию ведёт к тому, что *все три способа накопления и развёртки, использующие одноэлементные, строчные и кадровые фотоприёмники изображения, находят и будут находить применение в космическом малокадровом телевидении.* Это положение – возрождения в космосе систем с механическим сканированием (при абсолютном их вытеснении кадровыми системами из вещания), благодаря увеличению чёткости при ограниченной полосе частот видеосигнала, – наглядно иллюстрирует диалектический закон перехода количества в качество.

Важная идея С. И. Катаева о достаточности в телевидении более редкой последовательности кадров, чем диктуемая свойствами зрительного восприятия, имеет под собой глубокую теоретическую базу. На начальном этапе развития малокадрового телевидения, следуя *концепции достаточности точности* передачи, сформулированной создателем электронного телевидения В. К. Зворыкиным [84], слитность при передаче движения предметов относили к категории иллюзий [1]. Позднее было осознано, что любой сигнал, вне зависимости от того, принимает его человек или информационная машина, должен быть дискретизирован во времени так, чтобы он воспринимался как слитный. При этом оптимальная кадровая дискретизация определяется совместным влиянием динамики сюжета и фотонного отношения сигнал/шум таким образом, что ошибка оценивания формы и движения объектов начинает тонуть в шуме [75]. В плане развития теории телевидения, как раздела теории связи, малокадровое телевидение продвинулось дальше, чем телевизионное вещание, так как было свободно от оков стандартов, ориентированных на зрение человека, но зато потребовало согласования более широкого класса источников с более широким классом получателей информации [33]–[37], [75]–[80].

Конечно, в космических малокадровых телевизионных системах время кадра может очень сильно изменяться в разных аппаратах. Так, слитность изображения поверхности Земли вдоль витка спутника в первых метеорологических системах с видиконными ТВ камерами достигалась при передаче 1 кадра в минуту [1]. Телевизионная съёмка кометы Галлея с пролётного космического

аппарата проводилась при времени кадра 10 с [21]. Механическое сканирование изображения в метеорологической телевизионной системе геостационарного КА «Электро» позволяло формировать два кадра (видимого и ИК диапазонов) примерно за 15 минут при номинальной периодичности передачи один кадр в час, что синоптики считают достаточным для слитности восприятия движения облаков [53]. Изображение первого космонавта Ю. А. Гагарина передавалось с частотой 10 Гц [1]. В существующих высокоорбитальных космических системах обнаружения ракет время кадра составляет несколько секунд [26], но именно из-за требования высокой слитности передачи движения имеет тенденцию к уменьшению до нескольких десятых долей секунды [37], сближая малокадровое космическое телевидение по времени передачи кадра с телевизионным вещанием. Более того, развитие концепции равновесного согласования скорости создания информации источником с пропускной способностью канала связи [75]–[79] привело к осознанию относительности термина «малокадровое телевидение». Например, в системах адаптивной оптики, умеющих противостоять вредному влиянию турбулентности атмосферы, при анализе искажений волнового фронта для обеспечения слитности движения изображений световых сигналов требуются телевизионные системы с кадровой частотой 100...1000 Гц. Для разработчиков таких сверхбыстродействующих систем вещательная частота кадров 50 Гц – явно «узкополосная» и «малокадровая». Такое перекрытие диапазонов кадровых частот телевизионных систем двух классов тоже можно считать иллюстрацией закона диалектики о единстве и борьбе противоположностей [73]. Другой крайностью малокадрового телевидения, наиболее удалённой по времени кадра от вещания, является телевизионная астрономия (наземная и внеатмосферная), где типичное время накопления кадра – несколько часов. При этом астрономы, пользуясь своими представлениями о слитности изображения, производят сложение множества кадров своих «телефильмов» для увеличения проникающей способности телескопов. Однако лишь гигантские расстояния позволяют просто складывать эти «малокадровые кадры», но с точки зрения телевизионной техники накопленные последовательности кадров – типичный способ «прореживания информации», положенный в основу малокадрового способа передачи.

«Фамильным признаком» малокадрового телевидения является увеличенное по сравнению с телевизионным вещанием время *передачи* кадра, диктуемое узкополосным каналом связи. Однако,

при дефиците освещённости наблюдаемых объектов, в малокадровом телевидении открывается возможность *повышения чувствительности* за счёт увеличения времени *накопления* по сравнению с принятым в вещании вплоть до времени передачи кадра. На эту возможность обращал внимание ещё С. И. Катаев [71]: *«Таким образом, возможность повышения чувствительности иконоскопа мы получим лишь в том случае, если фотоаппаратный объектив, которым приходится снабжать передатчик, мы будем открывать не на 1/25 сек., а на 1/10, 1/5 и т. д. сек., в зависимости от того, насколько подвижным является объект. Другим источником повышения чувствительности при переходе на замедленную передачу является возможность понижения порога усиления электронного усилителя, связанная с тем, что при столь значительном сужении полосы помехи от ламповых шумов становятся заметно меньше»*. Именно благодаря этому *«и т. д.»* в статье С. И. Катаева, простирающемся и на секунды, и на часы, и даже на недели, а не только благодаря большому диаметру телескопа, стало возможным заглянуть в указанные выше космические дали. Конечно, для реализации очень большой чувствительности путём увеличения времени накопления нужен качественно иной уровень технологии фотоприёмников: начиная с единиц секунд для борьбы с темновыми токами требуется охлаждение фотоприёмных матриц различными способами, зависящими от множества ограничений и времени накопления [25].

«Узкая полоса частот» в телевидении может трактоваться с различных точек зрения, и одна из них связана с соотношением времени накопления и считывания. Исторически сложилось так, что в космических малокадровых системах (при большой освещённости и медленной смене сюжета) время накопления было заметно меньше времени передачи (считывания) [1], и лишь потом появились системы с очень большим временем накопления и относительно него небольшим временем передачи. Поэтому в период электронно-лучевого телевидения превышение времени передачи кадра над временем накопления считалось признаком малокадрового телевидения. В настоящее время, в период твёрдотельного телевидения, ситуация изменилась, и *в любой* телевизионной системе время накопления определяется не только временем передачи кадра, но и соотношением освещённости (плотности потока фотонов) и ёмкости элемента разложения, выраженной в максимальном числе электронов, передаваемых пикселем фотоприёмника без искажений. Связь освещённости и ёмкости

элемента разложения позволяет как в телевизионном вещании, так и в малокадровом телевидении, реализовывать автоматическую регулировку чувствительности ТВ камер, уменьшая при избытке освещённости время накопления в нужной мере по сравнению со временем передачи. Такое уменьшение даже в типовых вещательных ТВ камерах может составлять сотни и тысячи раз, что по признаку существенного превышения времени передачи над временем накопления роднит вещательные и малокадровые ТВ камеры. Эта родство также иллюстрирует диалектический закон единства противоположностей (об их «борьбе» будет сказано ниже) малокадрового и «быстрого» методов.

Диалектика развития малокадрового телевидения характеризуется также следующими этапами. Концепция малокадрового телевидения [71] была разработана с целью передачи телевизионных сигналов на коротких волнах, чтобы избежать необходимости использования УКВ. Но востребовано малокадровое телевидение было космонавтикой [1], и сразу же стало ясно, что короткие волны для неё не годны: и прохождения коротких радиоволн через всю толщу атмосферы Земли нет, и для передачи между различными космическими аппаратами с целью уменьшения массы и габаритов передающих антенн следует использовать УКВ. Также весьма показательным, что в заботе о телевизионном вещании С. И. Катаев писал [71]: *«Я здесь совершенно не рассматриваю формы применения этого способа в области диспетчеризации, где этот способ <...> является наиболее практичным»*. Но промышленное и охранное телевидение сразу заявило свои претензии на применение вещательной частоты кадров, и эти системы отличались от вещательных лишь в мелочах – методах синхронизации или специфических требованиях к качеству изображения.

У ортодоксальных специалистов телевизионного вещания во ВНИИТ ходило мнение, что *«прикладная ТВ камера – это испорченная вещательная»* – не все признавали *вольности* с числом строк и форматом кадра, с синхронизацией, т. е. неправильно понимали *лозунг малокадрового и космического телевидения – «ГОСТ нам не указ!»*. На самом деле это были не *вольности*, а новый путь, в начале – к эвристическому, а затем и к статистическому синтезу телевизионных систем, до сих пор не принятому большинством специалистов телевизионного вещания.

Здесь нельзя не отметить различие отношения к понятию развёртки у телевизионного вещания и у космического телевидения. Для специалистов телевизионного вещания развёртка – это только

средство для преобразования изображения как функции пространственных координат, времени и длины волны в функцию только одного аргумента – времени, что позволяет передавать этот многомерный сигнал по одномерному каналу. Конечно, такое преобразование может быть осуществлено только *разрывно* (что, ссылаясь на законы топологии и теорию множеств Г. Кантора, отмечал ещё К. Шеннон [85]), в связи с чем и возникает дискретизация изображения на строки и кадры. Для специалистов космического телевидения развёртка – это более ёмкое понятие *микрпрограммирования эксперимента* [37].

Телевизионное вещание ориентировано на то, чтобы «обмануть человеческий глаз». И этот «обман», в частности, при вполне обоснованных ограничениях полосы пропускания, породил чересстрочную развёртку, при которой в одном полукадре передаются чётные строки кадра, в другом – нечётные. Конечно, в космическом телевидении иногда применяются принятые в вещании методы, в том числе и чересстрочная развёртка. Однако при наблюдении движущихся объектов чересстрочная развёртка приводит к специфическим искажениям (рис. 1.1.2) которые не приемлемы в специальных системах космического телевидения, где стоит задача измерения координат подвижных объектов в реальном времени.



Рис. 1.1.2. Влияние чересстрочной развёртки на передачу подвижных изображений

Космонавты 46 экспедиции на МКС
М. Б. Корниенко и С. Б. Волков
с орбиты поздравляют НИИ
телевидения с 80-летием (2015 г.)

Артефакты чересстрочной
развёртки на изображении
движущейся руки: в двух соседних
полях одного кадра изображения
объекта «разрываются»

В результате в космическом телевидении преимущественно применяется прогрессивная развёртка (от понятия арифметической прогрессии – так изменяются координаты телевизионных строк). Поэтому «антагонизм» телевизионного вещания и космического

телевидения, их диалектическое единство (технологическое) и борьба (методологическая) сопровождается встречным тезисом: *вещательная телевизионная камера с чересстрочной развёрткой – это испорченная космическая ТВ камера (с прогрессивной развёрткой).*

И только космонавтика отменила это «отрицание» малокадрового способа и приняла его «на все должности», включая диспетчеризацию – именно к ней можно отнести управление луноходом с Земли по сигналам малокадровых ТВ камер и контроль сближения и стыковки космических аппаратов [1].

С точки зрения теории информации ТВ камера выступает в роли кодирующего устройства, а телевизионный приёмник – декодирующего. Главным элементом декодера, превращающим телевизионный сигнал, как функцию одного аргумента (времени) в функцию как минимум трёх аргументов (двух пространственных и времени), является устройство отображения (кинескоп, ЖК-монитор и т. п.). Отображение телевизионного сигнала на экране электронно-лучевой трубки было освоено до рождения электронного телевидения, и в ходе экспериментов на начальном этапе малокадрового телевидения оставалось решить задачу согласования свойств приёмной трубки со временем передачи медленных телевизионных кадров [71]: *«Основным отличием <малокадровой приёмной электронно-лучевой> трубки является фосфоресцирующий экран с длительным послесвечением».*

На начальном этапе развития малокадрового телевидения, действительно, применялись приёмные электронно-лучевые трубки с длительным послесвечением. Однако практика применения таких кинескопов при продолжительном процессе наблюдения, например, при дежурстве оператора в ожидании какого-либо нештатного явления, показали быструю утомляемость наблюдателя и потребовали предъявления малокадрового телевизионного сигнала в более удобном виде. Первыми появились «преобразователи стандарта» на электронно-лучевых трубках, которые позволяли не только быстро считывать изображения с большой скоростью, но и производить накопление сигнала на экране. Но революционным изменением в наблюдении малокадровых телевизионных сигналов стало появление устройств цифровой кадровой памяти, в которых запись кадров осуществлялась медленно, в темпе поступления сигнала, а считывание осуществлялось с вещательной частотой кадров. В настоящее время такой цифровой «преобразователь стандарта» перестал быть не только новым, но и сложным устройством. Это

определяется тем, что запоминание одного телевизионного кадра требует ёмкости памяти от $\frac{1}{4}$ до 40 Мбайт, а уже сегодня в рамках всего лишь одной микросхемы при высоком быстродействии гигабайты – не проблема, а накопители видеoinформации смело перешагнули барьер терабайтов. Подчеркнём, что «цифровое телевидение», как метод *цифровой передачи* телевизионных сигналов и *цифровой, в том числе и межкадровой, обработки изображений* на приёмном пункте, родилось на три десятилетия раньше именно в малокадровом телевидении – в высокоорбитальной системе обнаружения стартов ракет [37]. Интересно, что на переходном этапе от малокадровых кинескопов к сочетанию цифровых преобразователей стандарта и вещательного кинескопа были случаи, когда в одной и той же приёмной аппаратуре старое размещалось рядом с новым – «на всякий случай» (аналогично тому, как на первых пароходах оставляли большие мачты для парусов).

Характерно, что многие идеи великих изобретателей опережали технологический уровень их эпохи. Конечно, идея малокадрового телевидения С. И. Катаева в телевизионном вещании не прижилась, но, благодаря его концепции, стало возможным не только снижение частоты кадров. В той же статье [71] Катаев сформулировал ещё одну, весьма нетривиальную мысль, воплощаемую в разных областях техники через 70 лет, на новом витке развития информационных технологий (что является иллюстрацией закона диалектики о развитии по спирали): *«Ввиду того, что суррогат высококачественного телевидения требует почти одной и той же полосы частот, что и передача на 1200 элементов, а также имея в виду, что характеры объектов, наиболее благоприятных для передачи, в том и другом случае сильно разнятся друг от друга – становится целесообразным такое совместное применение этих двух систем, в котором они будут хорошо дополнять друг друга, если при передаче пользоваться, подобно кино, крупным и мелким планом, нужным образом чередуя их.*

При передаче крупным планом в качестве объектов из всей картины объективом передатчика на 1200 элементов следовало бы выхватывать части, наиболее интересные характером своего движения <...>, в то время как при необходимости передачи <...> мелких и сравнительно статичных деталей и ландшафтов, переключать аппарат на большую чёткость за счёт уменьшения числа кадров».

Здесь С. И. Катаев выдвинул сразу две идеи:

- *адаптации* телевизионной системы к динамике сюжета, которая, в частности, нашла развитие при разработке методов цифрового межкадрового кодирования в форматах *MPEG*; развитие этой идеи обеспечивает сжатие телевизионных сигналов так, что в вещательном телевидении в исходной полосе частот 6 МГц, отводимой на один канал, размещается 5...10 каналов;

- *двухканальной системы обнаружения*, в которой медленный широкоугольный канал ответственен за обзор пространства, а узкоугольный быстрый канал ответственен за точное измерение пространственно-временных координат обнаруженных медленным каналом объектов. Система по второй идее уже реализуется в рамках космического эшелона противоракетной обороны США¹. Объединение двух телевизионных систем – сканирующей малокадровой, имеющей высокую разрешающую способность по пространству, но малую по времени, и скоростной, имеющей обратное соотношение разрешающих способностей, – для космических комплексов подобного класса принципиально необходимо, что также относится к иллюстрации диалектического закона единства и борьбы противоположностей.

Перспективы развития малокадрового телевидения велики. Постоянно будет увеличиваться количество передаваемой из космоса информации о Земле. Рост количества информации отчасти будет обусловлен увеличением разрешающей способности систем – уже сейчас при наблюдении из космоса можно различать детали менее одного метра (конечно, в обзорных системах разрешение на несколько порядков хуже), а космические астрономические системы используют сборки матриц с числом пикселей, превышающем миллиард.

Перспективы развития малокадрового телевидения связаны с неиссякаемым исследовательским инстинктом человечества, которое никогда не скажет, что ему хватает информации, не отвернёт своего взгляда, вооружённого малокадровым телевидением, от космоса и от Земли из космоса. Поэтому можно утверждать: малокадровое телевидение имеет богатую историю, украшенную эпохальными достижениями человеческой цивилизации, и история малокадрового телевидения, его теории и практики, не окончена.

¹ «"Американе", – как любил говорить С. П. Королёв, – люди серьёзные» [45], и такие крупные научно-технические идеи не пропускают.

1.2. История вниитовского космического телевидения – философия в примерах

Первая в мире космическая телевизионная система была разработана в 1956–1959 гг. во Всесоюзном научно-исследовательском институте телевидения (ВНИИТ, в 1950–1960 гг. – ВНИИ-380, ныне – АО «НИИ телевидения»). На первом этапе НИР (ведущий разработчик В. В. Мустафин, закончилась в марте 1957 г.) во ВНИИ-380 была установлена нецелесообразность построения аппаратуры для объекта «ОД» на базе стандартных систем телевизионного вещания и определена необходимость разработки специальных узкополосных систем. В 1957 г. в рамках проводимой НИР в институте были изготовлены промежуточные образцы ТВ-техники для наблюдения за объектами внутри космического корабля.

В день запуска 2-го ИСЗ в институт приехал С. П. Королёв в сопровождении первого заместителя председателя Совнархоза Ленинградского экономического административного района С. А. Афанасьева, будущего министра общего машиностроения СССР. Дальнейшие события разворачивались стремительно. До окончания этапа научно-исследовательских работ перед ВНИИ-380 была поставлена первоочередная задача – создание телеаппаратуры, которая должна передать изображение невидимой стороны Луны. В работе, кроме ВНИИ-380, должны были принять участие ОКБ ЭВП, НИИ-695 ГК СМ СССР по РЭ, МЭИ, ЛЭТИ, НИКФИ, ГОИ им. С. И. Вавилова, завод №393, ЦКБ 589 ГК по оборонной технике, НИИ-778 ГК СМ СССР. Головным предприятием, ответственным за создание всей системы, был ВНИИ-380 [81].

В институте заказ получил название «Енисей». Научным руководителем темы был назначен к. т. н. И. Л. Валик, его заместителем – старший инженер-исследователь П. Ф. Брацлавец¹. В 1959 г. их статус несколько изменился. И. Л. Валик стал главным

¹ Здесь мы не будем упоминать большинство достойных уважения разработчиков систем космического телевидения, и, учитывая наличие публикаций [40], [80]–[82], отметим (хоть и не везде) лишь главных конструкторов. Более того, авторы полностью разделяют мнение космонавта Г. Т. Берегового [83]: *«Публика акцентирует внимание на исполнителях главных ролей. Но нам, космонавтам, имена тех, кто обеспечивает надёжность космического рейса, бесконечно дороги и близки. Доля их ответственности неизмеримо больше тех почестей, которые мы им пока в силах оказать».*

конструктором, П. Ф. Брацлавец – его заместителем. Под их руководством была создана первая космическая телевизионная аппаратура, основу которой составила идея С. И. Катаева [71] об узкополосной передаче телевизионных сигналов на космические расстояния, получившая в ходе работ по ТЗ С. П. Королёва название «малокадровое телевидение» [72]. Вторым важнейшим узлом первой космической системы был метод запоминания изображения – из-за необходимости большого временного разнесения восприятия света от обратной стороны Луны и передачей по радиоканалу телевизионного сигнала потребовалось запоминание ряда телевизионных кадров, без чего передать изображение обратной стороны Луны невозможно: Луна загораживает радиоволны, и для передачи полученного изображения нужно долго ждать, пока автоматическая станция «выглянет» из-за Луны. Первая в мире система космического телевидения создавалась на таком этапе развития электронной техники, когда ещё не существовало понятий «интегральная микросхема», в то время, когда транзистор был новинкой, и единственным способом, реализующим поставленную С. П. Королёвым цель, было запоминание изображений на фотоплёнке. Требуемый для этого фотографический аппарат с однорастворным методом обработки фотоплёнки был создан Красногорским механическим заводом. За этот химический этап обработки видеoinформации сотрудники отдела иронично называли аппаратуру «Енисей» банно-прачечным комбинатом [40]. Вместе с тем наличие фотографического процесса принесло существенно больший вред истории космического телевидения: систему «Енисей» часто называют фототелевизионной. На самом деле эта система, включавшая промежуточное запоминание изображения на фотоплёнке, имела всё необходимое и достаточное для того, чтобы называться просто телевизионной: оптическую подсистему, *фотоэлектрическое преобразование, накопление* (первичное – на фотоплёнке, вторичное – одноэлементное в системе «бегущего луча»), *развёртку* (про это телевизионное изобретение Н. Винер говорил, что оно может стать важнее самого телевидения) и *передачу по радиоканалу*.

4 октября 1959 г. в СССР был произведён запуск третьей многоступенчатой ракеты в дальний космос. На орбиту была выведена автоматическая межпланетная станция (АМС) «Луна-3» (рис.1.2.1) с телевизионной аппаратурой «Енисей» (рис. 1.2.2) на борту.

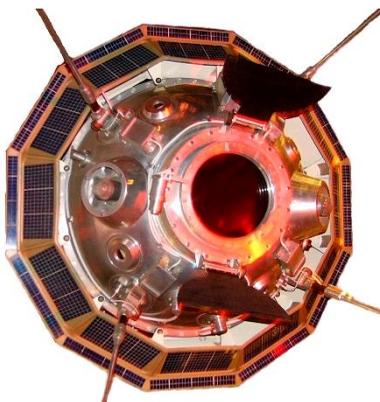


Рис. 1.2.1. Автоматическая межпланетная станция Луна 3 со стороны иллюминатора; музей космонавтики, Москва



Рис. 1.2.2. Бортовая аппаратура космической ТВ системы «Енисей»; музей НИИ телевидения

7 октября по команде с Земли в автоматическом режиме началась съёмка обратной стороны Луны. В аппаратуре были предусмотрены четыре сменяющиеся выдержки. На больших высотах (почти полмиллиона километров от земной поверхности) в автоматическом режиме проведена обработка пленки. Передача телевизионных изображений была обеспечена при непрерывном излучении радиоволн, когда АМС оказалась в зоне прямой видимости с Земли. Научно-измерительные пункты (НИПы) на Земле приняли первые в мире изображения обратной стороны Луны. И. Л. Валик и П. Ф. Брацлавец за это достижение стали лауреатами Ленинской премии.

Телевизионная аппаратура «Енисей», поразившая дерзостью научной мысли и простотой реализации идеи, – *первый мировой рекорд космического телевидения*, первый экземпляр космической информационной машины, выполняющий функции телескопа, вынесенного туда, где ещё не мог оказаться человек (рис. 1.2.3).

И сразу *второй мировой рекорд* – изображение обратной стороны Луны в автоматическом режиме передано на Землю. На ещё непросохшем отпечатке изображения главному скептику, опасавшемуся губительного влияния радиации на аппаратуру, С. П. Королёв написал: «Уважаемому А. Б. Первая фотография обратной стороны Луны, которая не должна была получиться. С уважением Королёв. 7 октября 1959 г.» [40].

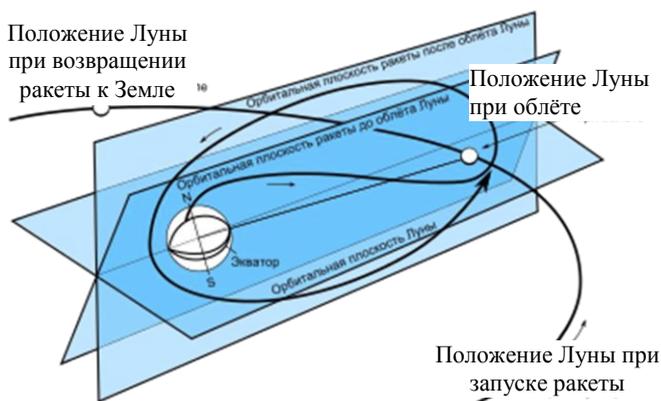


Рис. 1.2.3. Траектория полёта автоматической станции «Луна-3»

При первом наблюдении обратной стороны Луны в октябре 1959 г. были получены кадры, позволившие разглядеть большую часть невидимой с Земли поверхности Луны. С. П. Королёв среди многих целей в исследовании космоса поставил также задачу создания лунного глобуса. Для его построения потребовалось устранить «белые пятна», оставшиеся после эпохальной операции 1959 г. Для этого в 1965 г. НПО Космического приборостроения с помощью КА «Зонд-3» завершил подробное наблюдение обратной стороны Луны.

Знаменательно, что уже при рождении космическое телевидение сразу «освоило» *вторую космическую скорость*, открыв дорогу всем последующим системам исследования планет солнечной системы, а не только системам наблюдения Земли. Историческая значимость телевизионной аппаратуры, встроенной в королёвскую «великолепную семёрку» (ракету Р-7), связана не только с прагматическим аспектом получения первых изображений из космоса и не только с идеологическим пафосом космического полёта, ставшего нашей национальной гордостью. Это достижение советской космической техники, *опередившей американскую*, имеет важное историческое значение и с точки зрения познания мира, и с точки зрения методологии приборостроения.

Следующая космическая ТВ система «Селигер», созданная во ВНИИТе для наблюдения за живыми объектами внутри космического корабля, была электронной. О том, что в космос полетят собачки, стало известно в институте в конце 1957 г.

21.06.1958 г. председатель Специальной комиссии при Президиуме Академии Наук СССР М. В. Келдыш и 02.07.1958 г. главный конструктор ОКБ-1 С. П. Королёв утвердили ТЗ на создание телевизионной аппаратуры для передачи изображений подопытного животного. Заказ во ВНИИ-380 получил название «Селигер» (научный руководитель темы – И. Л. Валик, главный конструктор – П. Ф. Брацлавец). Основной задачей было наблюдение за поведением собачек во время старта и в условиях невесомости. Изготовить аппаратуру в исключительно сжатые сроки! *«Фактически это означало, – писал Брацлавец, – решение уравнения со многими неизвестными, например, как будет функционировать ТВ-аппаратура в условиях огромных виброперегрузок, в первую очередь, передающие ТВ-трубки и другая доступная по тому времени элементная база; какую конструкцию следует придать отдельным блокам и всему комплексу и, конечно, как обеспечить необходимые параметры ТВ-изображения в месте приёма; изготовить, испытать и поставить несколько комплектов аппаратуры с подтверждением соответствующими испытаниями; обеспечить электромагнитную совместимость с другими бортовыми системами; успеть создать ТВ-оборудование пункта приёма и многое другое»* [40]. Освещённость внутри КА была в несколько раз ниже расчётной (порядка 3...4 люкс на фотокатод). Специалисты до предела использовали усиление канала, ввели отбор трубок по чувствительности, подобрали оптимальную окраску стенок кабины, дали рекомендации о масти животных – предпочтительным был белый цвет (рис. 1.2.4). Для полёта Белки и Стрелки выбрали «объёмное» освещение (перед собаками, сбоку и сзади–сверху).



Рис. 1.2.4. Изображение Стрелки, переданное с орбиты аппаратурой «Селигер»

Специалисты знали, что полёт Белки и Стрелки – это эксперимент перед полётом человека в космос, а значит, аппаратура должна быть с большим запасом прочности. Но как это сделать? *«При испытаниях на вибростенде, – вспоминала М. И. Мамырина, – монтаж не выдерживал. Мы прямо в отчаяние приходили. Потом оказалось, что вибростенд, с которым тогда ещё мало работали,*

на некоторых частотах входил в резонанс и буквально вырывал детали из наших схем».

В результате создали миниатюрное изделие весом 3 килограмма на передающей трубке типа «видикон» (ЛИ-23), экономичных стержневых лампах (изделие НИИ-160, Фрязино) и на только что появившихся тогда полупроводниковых триодах. Камеры сделали с прямым и угловым объективами «Меркурий-2» с фокусным расстоянием 20 миллиметров. В состав бортовой аппаратуры вошла также система осветителей (8 светильников и зеркало). В 1959 г. начались работы по сопряжению макета камеры ТВ системы «Селигер» с радиотехническим комплексом ОКБ МЭИ («Топаз») и затем с общим комплексом космического корабля.

19 августа 1960 г. стартовал космический аппарат (тогда он назывался «Восток-1» № 2) с собачками Белкой и Стрелкой на борту. Наблюдение за объектом вели пять НИПов: НИП-1, НИП-6, НИП-9, НИП-10; НИП-13. Две телевизионные камеры системы «Селигер» по радиоканалу «Трал-Т» (ОКБ МЭИ) в течение суток передавали изображения собачек на НИПы. Впервые в истории человечества с борта космического корабля была осуществлена телевизионная передача движущихся объектов, которая на Земле была записана на киноплёнку. Это *третий мировой рекорд* в области космического телевидения.

12 апреля 1961 г. – начало работы телевидения на пилотируемую космонавтику. ТВ камера системы «Селигер» работала во время всего полёта Ю. А. Гагарина на КК «Восток-3». Изображение первого космонавта планеты (рис. 1.2.5), переданное с борта космического корабля (*четвёртый мировой рекорд*), принимали три НИПа на Земле: №№ 1, 4 и 6. Материалы регистрации полёта являются свидетельством прорыва человека в космическое пространство. Музей НИИ телевидения хранит (рис. 1.2.6) как киноматериалы полёта, так и ТВ камеры, которые, пусть и с весьма скромным качеством из-за малой доступной пропускной способности канала связи (100 строк, 10 кадров/с), передавали из космоса изображение первого космонавта планеты Ю. А. Гагарина.

С учётом требования С. П. Королёва об улучшении качества телевизионного сигнала в институте велась разработка телевизионных камер на 200, 400 строк (заказ «Ястреб», гл. конструктор П. Ф. Брацлавец) и 625 строк (заказ «Сокол», гл. конструктор И. А. Росселевич) [81], [82].



Рис. 1.2.5. Телевизионный кадр: Ю. А. Гагарин в космическом полёте



Рис. 1.2.6. Генеральный директор АО «НИИ телевидения» А. А. Умбиталиев демонстрирует В. И. Матвиенко гагаринскую ТВ камеру

В августе 1962 г. *впервые в мире (пятый мировой рекорд)* бортовое телевидение космических кораблей «Восток-3» и «Восток-4» было сопряжено с вещательной сетью страны, Интервидения и Евровидения. (ТВ комплекс ВНИИ-380; синхронизацию ТВ камер и наземной аппаратуры, а также передачу ТВ сигнала по радиоканалу обеспечивало ОКБ МЭИ). Изображение, принимаемое на ИП-9, ИП-10 и в «Медвежьих озёрах», транслировалось на Московский телецентр и далее в телевизионную сеть Кремля, всей страны, Интервидения, Евровидения и телевизионную сеть США.

Телевизионное изображение, полученное с помощью космической ТВ аппаратуры системы «Ястреб» с нестандартными параметрами разложения (400 строк, 10 кадров, прогрессивная развёртка), предварительно перезаписывалось на специально разработанных устройствах с целью переложения со стандарта «Ястреба» на вещательный стандарт (625 строк, 50 кадров чересстрочная развёртка). Трансляция изображения осуществлялась с помощью аппаратуры «Олень-Д», созданной во ВНИИ-380. По свидетельству разработчиков и по материалам кинорегистрации полётов можно судить о высоком качестве передаваемого изображения. Первый групповой полёт положил начало новому направлению – *космовидению* (термин, введённый главным конструктором космической ТВ системы П. Ф. Брацлавцем, признанным Федерацией космонавтики России создателем космического телевидения, рис. 1.2.7).



Рис. 1.2.7. Пётр Фёдорович Брацлавец в музее НИИ телевидения и медаль его имени

В 1966 г. *впервые в мире* (на год раньше, чем в США, *шестой мировой рекорд*) с помощью ТВ системы «Беркут» (рис. 1.2.8, разработка ВНИИТ; радиоканал ОКБ МЭИ, ВНИИТ и НИИРС) с высоты почти 40 тыс. км были получены чёрно-белые телевизионные изображения почти полного диска Земли. В результате был реализован замысел С. П. Королёва о *«телевизионном взгляде на всю Землю»*. Эти снимки нашей планеты вошли в ряд выдающихся достижений космического телевидения. В дальнейшем качество изображений Земли из космоса в интересах метеорологии (с геостационарной орбиты, рис. 1.2.9) и с целью обнаружения стартов ракет существенно возросло.

Метеорологические системы претерпели несколько этапов развития. На первом этапе магия высокой чувствительности видиконных систем (достигаемой за счёт сочетания кадрового накопления и внутреннего фотоэлектрического эффекта) привела к созданию четырёхканальной аппаратуры «Метеор» (рис. 1.2.10 и 1.2.11).

С 1964 по 2000 гг. для получения картины распределения облачности, снежного покрова и ледовых полей на земной поверхности было запущено 32 космических аппарата. Вместе с тем, «золотое» правило малокадрового телевидения работало, и на втором этапе (с 1975 г.) кадровое накопление на видиконах было заменено на одноэлементное (ФЭУ) с механическим сканированием вдоль строки и с кадровой развёрткой за счёт пролёта спутника (рис. 1.2.12, 1.2.13), затем – с механическим двухкоординатным сканированием в аппаратуре геостационарного КА (рис. 1.2.14).



Рис. 1.2.8. КА «Молния» с ТВ камерой «Беркут»; музей ВКА им. А. Ф. Можайского



Рис. 1.2.9. Изображение Земли с российского метеорологического спутника «Электрон»

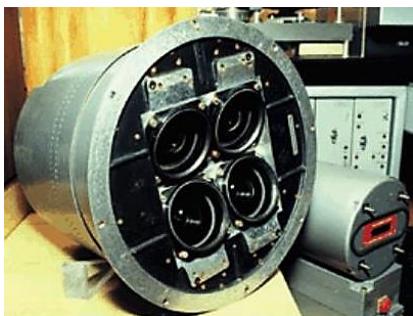


Рис. 1.2.10. Первая четырёхканальная видиконная метеорологическая система; музей НИИ телевидения



Рис. 1.2.11. Первый бортовой видеомagneтофон для метеорологической системы; музей НИИТ



Рис. 1.2.12. Сканирующая ТВ камера аппаратуры «Метеор»



Рис 1.2.13. Изображение, переданное аппаратурой «Метеор»



Рис. 1.2.14. Сборка КА «Электро» с аппаратурой «Метеорит-Планета»

кого наведения антенны, системы контроля аппаратуры, а также руководство разработкой всего комплекса (гл. конструктор – Н. Ю. Баймаков).

В начале 1960-х гг. создается ТВ камера кругового обзора «Волга» с двухкоординатным сканированием, входящая в состав узкополосной механической системы для панорамирования лунной поверхности (гл. конструктор Б. И. Баранов, рис. 1.2.16). «Волга» использовалась на АЛС-4, 5, 6, 7, 8. К сожалению, лунные станции не могли прилуниться из-за неисправности космических аппаратов. Во время последнего пуска АЛС с камерой «Волга», когда космическая станция пролетала на близком расстоянии от Луны, с Земли была дана команда на включение телевизионной аппаратуры. Полученный ТВ сигнал свидетельствовал о высоком качестве ТВ изображения. Опыт ВНИИТ был учтён при создании аналогичной камеры НИИ-885 (позже НИИКП, РНИИКП, ныне РКС), куда были переданы образцы и документация аппаратуры «Волга». ТВ камера аппарата «Луна-9» – это улучшенная аппаратура «Волга», с тем же набором узлов и деталей, с той же разрешающей способностью,

Приём метеоинформации показал необходимость повышения точности измерений траектории полёта спутника, уточнения целеуказаний, выдаваемых на пункты приёма и, в целом, создания новой антенной системы «Фобос» (совместная работа ВНИИТа – ответственного за весь комплекс, НПО им. Коминтерна, КБ общего машиностроения, завода «Большевик»). Было изготовлено антенно-фидерное устройство с антенным полотном в виде синфазной решетки из 384 спиральных излучателей (рис. 1.2.15). ВНИИТ осуществлял разработку приёмных устройств с малощумящими параметрическими усилителями, системы автоматического

формой сигнала, средствами передачи и приёма. С помощью такой камеры впервые в мире была получена панорама лунной поверхности (1966). К этому рекорду ВНИИТ причастен, и поэтому ТВ камера «Волга», прошедшая летные испытания и хранящаяся в Музее телевидения, признана памятником науки и техники мирового значения.

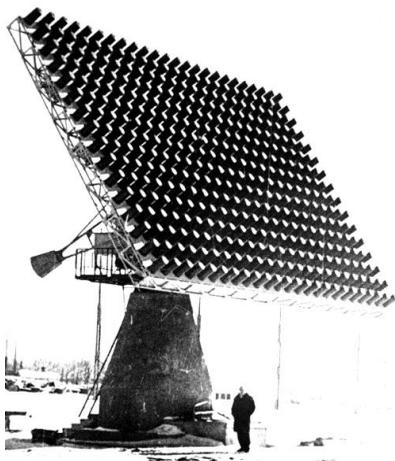


Рис. 1.2.15. Антенна для связи наземного пункта с КА



Рис. 1.2.16. Панорамная камера «Волга»

Институтом разрабатывался широкий спектр телевизионной аппаратуры для пилотируемой космонавтики «Кречет» (гл. конструктор П. Ф. Брацлавец), используемой для внутрикорабельной деятельности космонавтов¹, для внекорабельной деятельности (переносные ТВ камеры) и для контроля стыковки космических аппаратов (рис. 1.2.17). В частности, в 1962 г., С. П. Королёв сформулировал «Предложения по созданию средств для орбитальной сборки» [2, с. 445]. Конечно, мысль эта возникла сразу после полёта Гагарина: с первых же слов своих Предложений С. П. Королёв сформулировал проблему обеспечения сближения КА на орбитах

¹ Трепетное отношение космонавтов к телевидению видно из воспоминаний Г. Т. Берегового [83]: «Оглядываю ещё раз все закоулки отсека: всё ли взял, не забыл ли чего-нибудь: ведь ему предстоит сгореть при входе в плотные слои атмосферы... Все необходимые вещи и аппаратура давно увязаны и закреплены в пилотной кабине, там же и космическая "контрабанда" – переносная портативная телекамера...»

спутников Земли, подчёркивая, что *«Решение проблемы сближения и стыковки на орбите является также и решением основных вопросов, без которых ближний космос нельзя считать освоенным»* [2, с. 445]. С. П. Королёв наметил несколько стратегически важных этапов освоения сборки орбитальных станций, в качестве первого предложил *«создание на базе корабля "Восток" полуавтоматического комплекса сборки»* [2, с. 446]. Эта идея «полуавтоматичности» – активного взаимодействия человека и техники – в проблеме контроля сближения и стыковки в современной терминологии соответствует понятию интерактивного управления. При этом



Рис. 1.2.17. Бортовая аппаратура для пилотируемой космонавтики

С. П. Королёв, обычно нацеленный на *результат*, в своих Предложениях неоднократно отмечает особенность этой задачи как *процесса*. С. П. Королёв сразу выделил восемь этапов процесса сближения и стыковки КА [2, с. 446–447], из которых к рассматриваемой теме относятся:

«3. <...> По целеуказаниям с Земли пилот включает координатные двигатели, и корабль «Восток-Ж» начинает сближаться с ракетным блоком. Этот процесс (этап сближения) продолжается до тех пор, пока корабль не подойдёт к ракетному блоку на расстоянии 5–10 км.

4. С этого расстояния пилот с помощью аппаратуры радиопоиcка и наведения ориентирует ось корабля в направлении на ракетный блок. Одновременно включается аппаратура автоматического наведения и сближения, управляющая ориентацией корабля и работой координатных двигателей.

5. По командам этой аппаратуры корабль приближается (этап автоматического сближения) к ракетному блоку до расстояния 100–200 м. С расстояния 100–200 м пилот берёт управление в свои руки, подводит корабль к ракетному блоку (этап причаливания) и осуществляет стыковку корабля и ракетного блока с помощью механических замков».

Этот метод сближения КА в основных своих чертах не претерпел изменений и до настоящего времени: как и задумывал С. П. Королёв, поэтапность процесса сближения (этапы и методы дальнего и ближнего наведения) как с маневрирующими, так и с неманеврирующими КА стала реализацией важного принципа итерационного приближения к цели: в частности, ТВ камеры имеют переключаемый масштаб изображения (рис. 1.2.18).



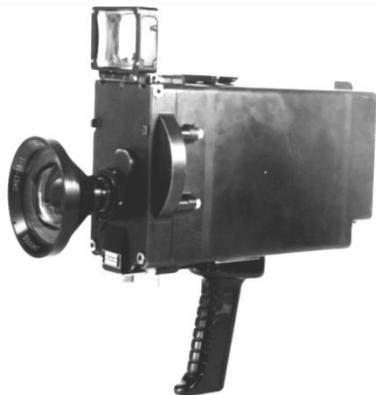
Рис. 1.2.18. ТВ камера контроля сближения КА с двумя полями зрения

Первая в мире стыковка КА осуществлена уже без С. П. Королёва в октябре 1967 г. (*седьмой мировой рекорд*).

С помощью бортовых ТВ камер ВНИИТ была произведена автоматическая стыковка космических аппаратов «Космос-186» и «Космос-188», в январе 1969 г. – стыковка пилотируемых КК «Союз-4» и «Союз-5». При этом телевизионное изображение, обеспечивавшее космонавтам контроль сближения и стыковки, транслировалось в Центр управления полётами (ЦУП), но вмешательства с Земли в процесс сближения и стыковки не потребовалось. Иллюстрации с телевизионными кадрами сближения КА в книге [1] по старинке названа «кинограммой». Контролируемое сближение и стыковка дали возможность увеличить пребывание экипажей в космосе и планировать полёты на другие планеты. Стыковочные агрегаты России и сегодня остаются самыми надёжными в мире.

Тема стыковки космических кораблей имеет ряд аспектов. Например, в 1974 г. была создана первая отечественная цветная космическая ТВ система для обеспечения первого международного полёта космических кораблей «Союз» (СССР) и «Аполлон» (США),

состоявшегося в 1975 г. В аппаратуре ВНИИТ «Арктур» (гл. конструктор В. Б. Иванов) из-за того, что ВНИИЭЛП не успевал к ответственному мероприятию довести до нужных эксплуатационных требований цветной видикон, использован хорошо освоенный чёрно-белый с последовательной передачей сигналов



синих, зелёных и красных кадров (сменяемых с помощью вращающейся турели цветных светофильтров, рис. 1.2.19). На Земле эти последовательные сигналы преобразовывались в одновременные. Была создана многозвенная система передачи и приёма цветных изображений с бортов КК, задействовано 8 приёмных пунктов, созданных ранее

Рис. 1.2.19. ТВ камера «Арктур»

для сети «Кречет» и дополненных контрольно-испытательными

приборами. Информация с НИПов в эстафетном порядке «стекалась» во вновь созданную Центральную техническую аппаратную на Шаболовке. Отсюда она распределялась по потребителям.

Все космические системы имели наземные пункты приёма информации, даже если главными пользователями видеоинформации были космонавты. Подготовка к космическим полётам сопровождается обучением космонавтов на тренажерах. ВНИИТ с первых шагов освоения космической тематики создаёт отдельные блоки (на первом этапе), с середины 60-х гг. – телевизионные комплексы для тренажеров (гл. конструкторы П. Ф. Брацлавец, А. Н. Лебедев, Г. Е. Кассич и др.). Тренажёр «Волга», размещавшийся в Центре подготовки космонавтов, был предназначен для отработки у пилотов КК серии «Союз-7К» навыков стыковки с помощью бортового ТВ-комплекса. Самым сложным тренажёром для космических кораблей серии «Союз» был тренажёр ТДК-7К (рис. 1.2.20). Этот тренажёр, введённый в эксплуатацию в 1965–1967 гг., располагался в ЦПК и включал в себя подлинный корабль «Союз», только без приборно-агрегатного отсека, то есть спускаемый аппарат и бытовой отсек. [40].



Рис. 1.2.20. Тренажёр ТДК-7К

экипаж «Союза-25»

В. В. Рюмин и В. В. Ковалёнок

экипаж «Союза-21»

Б. В. Вольнов и В. М. Жолобов

При возвращении, на подлёте к Земле, на экран ТВ-индикатора КР-73А (рис. 1.2.21), размещённого на приборной доске спускаемого аппарата (СА), должна была накладываться специальная прозрачная пластина с нанесённой кривой линией («маска»). Следует заметить, что технология изготовления «масок» была достаточно сложна. В зависимости от траектории подлёта СА к Земле на борт его сообщалось об оптимальном варианте траектории спуска и, соответственно, номере «маски». Этих вариантов насчитывалось около двадцати, на борту КК было столько же «масок». Пилот, получив с Земли необходимую информацию, должен был установить на экран индикатора соответствующую «маску» и, управляя двигателями ориентации спускаемого аппарата корабля 7К-Л1, вести перекрестие из горизонтальной и вертикальной линий по кривой «маски» [40]. Для оценки масштабов этих работ можно для примера привести фото наземного комплекса «Арктур» (рис. 1.2.22) [40], [81].

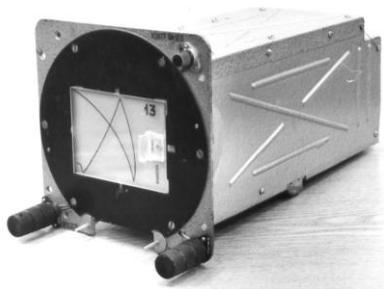


Рис. 1.2.21. Индикатор (ВКУ) КР-73А с «маской» из комплекса ТВ-аппаратуры КЛА Л1



Рис. 1.2.22. Центральная техническая аппаратная для приёма, обработки и распределения ТВ информации с бортов космических кораблей «Союз-19» и «Аполлон» во время их совместного космического полёта в июле 1975 г.

Отечественное приёмное оборудование «Сюжет» нескольких поколений, созданное НИИ телевидения (рис. 1.2.23), принимает в реальном времени метеоинформацию от отечественных космических аппаратов «Ресурс ДК», «Монитор-Э», «Метеор-М» и ряда оборонных КА, а также от американских спутников «Геосат», «Метеосат», «Иконос».



Рис. 1.2.23. Приёмная аппаратура и изображение на экране монитора метеорологической видеоинформации наземными комплексами «Сюжет»

В марте 1979 г. – новый триумф космического телевидения. Впервые в мире с помощью ТВ системы ВНИИТ на базе аппаратуры «Клёст» (главный конструктор Н. Ю. Баймаков) осуществлена дуплексная связь между Землей и КА (связь Земля–борт–Земля), о которой даже великий фантаст Александр Беляев не мечтал. Специалисты института совместили передающий и приёмный каналы на одной системе «Фобос», установили радиопередающее устройство вместо резервного радиоприёмного комплекса. Были разработаны развязывающее устройство, разделительные фильтры. Телепередача на борт корабля потребовала особо точных измерений параметров орбиты, поскольку при этом исключался режим автоматического наведения антенны. Для осуществления столь дерзкой задачи на Земле была развёрнута сеть приёмных пунктов. Космическое телевидение распахнуло горизонты и установило связь космонавтов с Центром управления полётами КА (рис. 1.2.24) [81].



Рис. 1.2.24. В Центре управления полётами в г. Королёве поддерживается двусторонняя телевизионная связь с экипажами МКС, в том числе в течение всех шести полётов С. К. Крикалёва, мирового рекордсмена по продолжительности полётов

Беспрерывно шли работы по созданию новой ТВ техники системы «Клёст», её модернизации для обеспечения полета ДОС «Мир» и других КА (гл. конструкторы в разные периоды А. Г. Козлова, Д. А. Сафьян, Ю. Л. Михальчук, В. А. Смирнов). Масштабные работы ВНИИТ ведёт в 80-е и в 90-е гг. Следует вспомнить единственный полёт КК «Буран». Институт разработал для осуществления этого проекта более 20 типов ТВ оборудования (гл. конструктор Сафьян Д. А.).

Унифицированный телевизионный комплекс «Клёст-М» значительно расширил функции, выполняемые бортовым комплексом «Клёст». Появились функции дублирования звуковой связи,

обмен телевизионной информацией между грузовыми беспилотными космическими кораблями и орбитальной станцией, в телеоператорном режиме производились стыковка, приём ТВ сигналов с наземных приёмных пунктов и т. д. К этому времени наземная аппаратура «Фобос»–«Кречет» была заменена аппаратурой «Орион» (1983–1990 гг., гл. конструктор А. В. Полушин) [81].

Но, конечно, кроме этих мирных профессий, у космического телевидения стояли и оборонные задачи. Правительственное решение о разработке разведывательной телевизионной системы вышло ещё в 1973 году. Уже после запуска первых искусственных спутников Земли, т. е. в конце 50-х годов, появились идеи использования ТВ аппаратуры для наблюдения Земли из космоса – причём с получением изображений объектов, размеры которых составляют всего несколько метров. Инициаторами исследований в этом направлении стали специалисты нашего института. В отделе, возглавляемом И. Л. Валиком, были начаты научно-исследовательские работы, и он стал главным конструктором серии заказов по этой тематике [40]. Первой телевизионной системой высокой чёткости для наблюдения наземных объектов была фототелевизионная система «Байкал». В период 1957–1962 гг. она была разработана и испытана в реальных условиях. Бортовая аппаратура системы размещалась на беспилотном космическом аппарате ОКБ С. П. Королёва; работала она в автоматическом режиме. Фотографирование заданных участков Земли производилось на аэрофотоплёнку 180 мм. Объектив имел фокусное расстояние 1 м. Обработка фотоплёнки, после съёмки очередного участка маршрута, происходила автоматически в специальном проявочном устройстве. Чёткость изображения в этой системе составляла 1500 строк. При высоте полёта КА 100 км и фокусном расстоянии объектива 1 м разрешение по местности было около 10 м. Такая невысокая детальность не позволяла решать целый ряд задач, ставившихся перед системами наблюдения Земли. Но это были первые результаты, полученные в реальных условиях, и этот опыт позволил определить дальнейшие пути совершенствования аппаратуры. За рубежом такого опыта в то время ещё не было.

В 1963 г. в ЦКБМ В. Н. Челомея были развернуты работы по созданию глобальной космической системы наблюдения (ТГР). Проектирование комплекса телевизионной аппаратуры выполнялось ВНИИТом по теме «Шмель». Соответствующими Правительственными постановлениями к выполнению этой работы было

подключено большое количество смежных организаций – ВНИИ «Электрон», ГОИ, КМЗ, НИИ электрографии, ЛОМО и др.

Первые космические телевизионные системы высокой чёткости в период 1960–1970 гг. строились по фототелевизионному принципу. В этих системах экспонирование высокочувствительной фотоплёнки осуществлялось щелевым затвором в аэрофотоаппарате. Затем плёнка проявлялась на борту в устройствах автоматической проявки, использующих специально разработанные для этого жидкостные и безжидкостные (контактно-диффузионная проявка) фотопроецсы. Проявленная и высушенная фотоплёнка поступала в устройство считывания изображения, в котором формировался телевизионный сигнал, передаваемый на пункты приёма [40]. По сравнению с «Байкалом» «Печора» была более совершенной фототелевизионной системой высокой чёткости. Она работала в полуавтоматическом режиме, т. е. обслуживалась на КА оператором-космонавтом.

В системе использовалась аэрофотоплёнка шириной 530 мм. Фотографирование участков земной поверхности производилось автоматически. Суммарная чёткость изображения составляла порядка 18000 строк, при полосе захвата на ширину плёнки 18 км. Расчётное значение разрешения на местности составляло 1 м. Система успешно прошла лётные испытания в 1976–1977 гг. Переданные на пункт приёма изображения участков Земной поверхности имели высокое качество и ничем не уступали фотографиям, полученным при аэрофотографировании с самолёта. Однако к этому времени уже была в завершающей стадии разработки автоматическая телевизионная система «Лидер», не требующая участия оператора и имевшая значительно большую производительность. Поэтому фототелевизионные системы не получили дальнейшего развития [40].

В отличие от предыдущего аналога – фототелевизионной аппаратуры «Печора» – в «Лидере» (рис. 1.2.25) требовалось применить чисто электронные устройства. Поэтому все основные элементы будущей системы создавались заново. Построены они были на специальных видиконах с памятью, каждая ТВ камера



Рис. 1.2.25. Телевизионная камера высокой чёткости ЛР-103

обеспечивала получение изображений с чёткостью 4000 строк. Таким образом, суммарная чёткость изображения наблюдаемого участка местности при маршрутной съёмке тремя камерами составляла 12000 строк.

Камеры были смонтированы на длиннофокусной оптической системе. Это позволяло получить хорошую чёткость изображений даже при малых контрастах объектов. При расчётной высоте полёта КА 220 км заданная полоса захвата составляла 18 км, по 6 км на каждую видеокамеру. Расчётное значение разрешения по земле составило 2 м. Указанные данные относятся к случаю вертикального наблюдения. Но для широкого обзора земной поверхности предусматривалась возможность поворота КА относительно его продольной оси. И вся полоса обзора в целом при этом составляла 500 км. Проводившиеся летные испытания системы «Лидер» подтвердили все заложенные в ней характеристики. Значение разрешения по земле 2 м относится к случаю наблюдения контрастных объектов. В реальных же условиях контрасты объектов меняются в широких пределах. Соответственно и на полученных реальных снимках участков Земли разрешение составляло 2...5 м. На снимках отчётливо наблюдались самолеты, корабли, железнодорожные составы, городские строения, гидротехнические сооружения, видны мосты, транспортные средства на дорогах и т. п. Передающая ТВ аппаратура была установлена на предназначенном специально для неё беспилотном ИСЗ. Работала она в автоматическом режиме и была рассчитана на длительный (не менее года) срок службы. Специально для аппаратуры «Лидер» в ВНИИ «Электрон» был создан уникальный видикон «Колос», на ЛОМО разработан широкополосный трёхканальный бортовой видеоманитофон [40].

Важность создания космической ТВ аппаратуры такого назначения, как «Лидер», не вызывает сомнений. Причём в процессе разработки «Лидера» одновременно велись исследования по дальнейшему развитию этого направления, предусматривалось применение ПЗС, средств обработки информации, более совершенных оптических устройств и т. д.

Твёрдотельная технология в сочетании с линейными фотоприёмниками в соответствии с «золотым» правилом космического телевидения [74], [75], благодаря возможности сборки большого числа линейных приборов, снимала огромное количество трудностей достижения широкого угла зрения систем, и работы в этом направлении во ВНИИТе были начаты в интересах систем разведки

и метеорологии. Но твёрдотельная революция в телевидении – событие не однодневное, и от появления первых отечественных ПЗС до готовности космической аппаратуры к полёту проходит много лет. Эта «растянутая революция» по времени перекрылась с перестройкой, завершившейся развалом СССР и сворачиванием финансирования космической деятельности. Поэтому были свёрнуты многие направления работ, обеспеченные интеллектуальным заделом и достаточным технологическим уровнем. Это ярко иллюстрируется тем, что и по сей день выпускаются востребованные космической техникой ПЗС – как матричные (для астродатчиков), так и ВЗН для космической разведки, изготавливаемые по имевшейся в СССР технологии с нормой точности около 1 мкм [32].

Космическая разведка предполагает не только наблюдение поверхности Земли с высоким разрешением, но и обнаружение стартов ракет [23], [26] [37]. Эти системы были практически одновременно созданы в США и в СССР. Инициатором создания высокоорбитальных систем обнаружения в нашей стране был П. Ф. Брацлавец, ставший их первым главным конструктором. Отечественные исследовательские низкоорбитальные образцы – различные модификации аппаратуры «Беркут» – запускались в 1960-х гг. и 1970-х гг., штатные высокоорбитальные образцы аппаратуры «Апогей»¹ с неохлаждаемыми ИК видиконами разработки ВНИИЭЛП (ЦНИИ «Электрон») (рис. 1.2.26) – в 1970-х гг. и 1980-х гг. (главным конструктором после П. Ф. Брацлавца в 1980–1987 гг. был В. П. Зайцев).

Эти системы устанавливались на высокоорбитальных космических аппаратах с трёхосной стабилизацией (в США после сорока лет использования одноосной стабилизации, т. е. вращением космического аппарата вокруг собственной оси, только сейчас переходят к трёхосной стабилизации). Для повышения фоноустойчивости была разработана аппаратура обнаружения «Иртыш» (главный конструктор М. А. Грудзинский) на криогенно охлаждаемых ИК видиконах разработки ВНИИЭЛП (ЦНИИ «Электрон») (рис. 1.2.27).

¹ В интересах создания системы предупреждения о ракетном нападении (СПРН) разрабатывались и эксплуатировались два варианта аппаратуры: со сканирующим фотоприёмником (ГОИ им. С. И. Вавилова, НПО «Геофизика») и фотоприёмником с кадровым накоплением (ВНИИТ).



Рис. 1.2.26. Аппаратура «Апогей»



Рис. 1.2.27. Аппаратура «Иртыш»

В интересах СПРН во ВНИИТ велась разработка экспериментальных образцов космических ТВ систем глубокого охлаждения, работающих в различных спектральных диапазонах на различных видах фотоприёмников – электроннолучевых трубках (ЭЛТ), приборах с зарядовой связью (ПЗС) и твёрдотельных электронных преобразователях (ТТФЭП).

Подводя итог этому разделу следует сказать, что рождённое в нашей стране, в Ленинграде, во ВНИИТе, космическое телевидение распространилось по всему миру, так же, как и радиосвязь, изобретенная в нашем городе А. С. Поповым, родившимся за 100 лет до радиопередачи из космоса обратной стороны Луны. О смелости изобретений АО «НИИТ», о его «планах обширных», мировом приоритете в области создания космического телевидения свидетельствует памятная доска на фасаде здания института, Знак Федерации космонавтики России, учреждённый в честь создателя космического телевидения, а также высокие награды разработчикам космических ТВ систем. В романе «Чудесное око», посвящённом прикладному телевидению, Александр Беляев пафосно завершает свой рассказ о телевидении, имея в виду, конечно, добычу знаний, а не развлечения, о которых он не мог подозревать:

«Да, сам человек претерпит чудесное превращение, поднимется на высшую ступень, приобретёт "божественные" свойства всевидения и всеслышания.

Вечная слава тем, кто трудился над созданием этих новых орудий человеческого познания мира – "сверхушей" и "чудесного ока"!»

Глава 2. ТЕОРИЯ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

2.1. Статистический анализ и синтез. Цели и методы статистического синтеза

Проектирование космических видеоинформационных систем должно быть едино и подчинено *цели космического полёта*. Для единства проектирования необходимо без противопоставления различать теорию проектирования, практику проектирования, технологию и технику: *«потребности исследования космоса нельзя удовлетворить без решения основных проблем космического телевидения: проблемы резкого увеличения дальности телевизионных передач и проблемы достижения предельной светочувствительности. Указанные проблемы в сочетании с высокой стоимостью каждой двоичной единицы информации из космоса служили мощным стимулом не только к совершенствованию технологии изготовления аппаратуры, но и к созданию теории, обеспечивающей проектировщиков систем космического телевидения методом синтеза оптимальной системы»* [1, с. 64].

Специфических свойств у космической видеоинформатики несколько, среди них обеспечиваемые техникой и технологией требования исключительной надёжности в условиях воздействия факторов космического пространства, связанных с выводом на орбиту и функционированием на ней при разнообразных воздействиях (см. раздел 3.1). При проектировании видеоинформационных систем имеют в виду четыре основные стадии их жизненного цикла: разработка (анализ – формализация фоно-целевой обстановки или априорной информации об источнике информации, синтез – определение оптимальной структуры и параметров системы при выбранных критериях и ограничениях), тестирование системы на основе сформированной с учётом результатов анализа представительной выборки сюжетов и эксплуатация в натуральных условиях (в последней выделяют начальный этап лётно-конструкторских испытаний).

Синтез систем подразделяется на теоретический и инженерный (главной чертой которого является *прагматическая цель*). Цель синтеза – создание систем с наилучшей совокупностью показателей качества при имеющихся ограничениях на реализацию.

Теоретический синтез информационных приборов подразделяется на структурный и параметрический (наиболее формализованный). Стратегия синтеза строится на основе *опорной триады: априорной информации, критериев качества и ограничений*. При оптимизации используют совокупность показателей качества и формируют функционал, включающий взвешенную сумму частных показателей качества. Вектор весовых коэффициентов при этих показателях называют «вектором концепции системы» [87], [199]. Вместе с тем в подавляющем большинстве ТЗ эта часть проектирования неформально ведётся в ходе его составления, и частные показатели качества системы приобретают вид ограничений. При этом критерием качества синтеза становится уменьшение затрат на производство, в качестве априорной информации выступают результаты структурного синтеза, ограничения излагаются в ТЗ.

Важной особенностью (как теоретического, так и инженерного) синтеза является трудность его алгоритмизации в силу возможной непрерывности или дискретности различных исходных данных и искомых переменных. В соответствии с общей методологией оптимизации в технике [127] синтез практически всегда является итерационным (циклическим) процессом с неоднократными возвращениями к началу при отклонении получаемых параметров от значений ограничений или отсутствия уверенности проектировщика, что достигнут искомый минимум стоимости.

Вместе с тем *идейный облик* видеоинформационной системы (её информационную структуру и ключевые параметры) определяет теоретический раздел проектирования – статистический синтез.

Цель космического полёта определяет структуру получаемой и передаваемой информации. Например, если цель – глобус, то решение – это оценка формы объекта (очень большой набор чисел, мегабайты), если цель – ориентация КА, то решение – это направление осей КА на точки небесной сферы или центр планеты (малый набор чисел, байты).

Цель обработки информации в видеоинформационной системе на всех этапах (формирования, передачи и цифровой обработки изображений) можно сформулировать разными способами. Например, можно поставить задачу «*извлечения максимума количества информации о входном оптическом изображении*» [1, с. 118]. Эта задача в [1] не была решена, и, как показали дальнейшие исследования [33]–[37], из-за необозримого количества информации о пространственно-временных координатах *каждого*

фотогенерированного электрона не могла быть решена; вместо этого в [1] было найдено условие достижения максимума отношения сигнал/шум для малоразмерного сигнала и декларировано значение допустимого смаза изображения на половину элемента разрешения.

Ниже в приложении к космическому телевидению развивается концепция достаточности точности, сформулированная В. К. Зворыкиным [84] исходя из ненужности передачи того, что человеческий глаз всё равно не воспримет из-за ограниченности его разрешающей способности по полю и по времени. Эта «телевизионная» идея В. К. Зворыкина нашла развитие в теории связи в виде понятия скорости передачи при заданном искажении (*rate distortion*) [85] или эквивалентного понятия энтальпии [86]. Ниже часто будет использовано указание А. Н. Колмогорова [86], *который настаивал на главной роли взаимной информации $I(x, y)$ между передаваемым сигналом x и принятым сигналом y , а не энтропии; энтропия и пропускная способность являются лишь функционалами от неё, и то и другое – скорости, энтропия – создания информации, пропускная способность – передачи информации, и измеряются они в одинаковых величинах, напр., бит/с или бит/символ [85, с. 264]*¹ (единство размерностей особо важно в уравнениях, где эти величины приравниваются, и в функционалах, где они вычитаются):

$$H = \min I(x, y), C = \max I(x, y)$$

Космическое телевидение чётко обозначило научную проблему, состоящую в равновесном согласовании источника и канала, которая выходила за рамки известного со времён Хартли и Шеннона согласования в теории связи [78], [79]. Математически оптимальные системы могут быть описаны уравнением связи [78], которое учитывает цель повышения качества передачи при учёте ряда ограничений. Уравнение связи стало развитием понятия энтальпии, учитывающим стремление к минимально достаточному количеству доминантной информации. Оно предписывает согласование источника и канала, в ходе которого скорость создания информации источником (ТВ камера плюс цифровой кодер источника) приближается к энтропии источника, а скорость R передачи в канале стремится к его пропускной способности. При достижении равновесия энтальпия H_ϵ источника равна

¹ В телевидении под символом понимают либо пиксел, либо кадр; в последнем случае пользуются не битами, а килобайтами, мегабитами и т. п.

пропускной способности C_ε канала, т. е. они сходятся в «седловой» точке и становятся **одной** и той же величиной [79] (рис. 2.1.1).

Проектирование космических телевизионных систем высве-

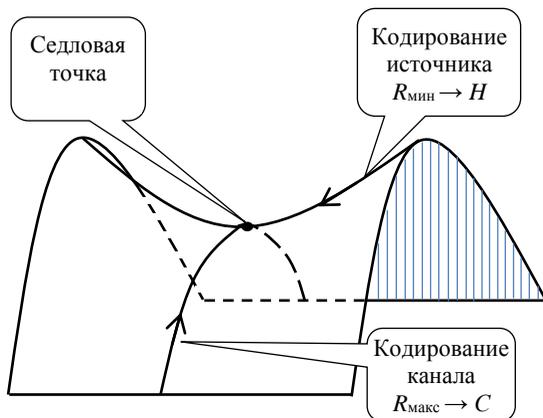


Рис. 2.1.1. Цель совместной оптимизации кодирования источника и кодирования канала – информационное равновесие

тило специфику, которая состоит в том, что проектировщики в соответствии с двумя ветвями информатики делятся на два лагеря: один лагерь проектировщиков называется «камерщики» (разработчики ТВ камер – источников информации), а другой – проектировщики каналов связи. В ходе их *неантагонистической* игры становится ясным, что скорость создания информации источником информации не менее важна, а скорее более важна, чем пропускная способность канала [79].

Важным побудительным мотивом для развития концепции качества информации является мысль А. Н. Колмогорова [86]: *«Однако так как "информация" по своей природе не обязана быть (и в действительности не является!) скалярной величиной, то никакие аксиоматические исследования указанного направления не могут ответить на вопрос о том, сколь полно характеризует величина $I(\xi, \eta)$ интересующую нас информацию»* (А. Н. Колмогоров обозначал сигналы соответственно ξ и η).

Согласно концепции достаточности точности при синтезе космических видеоинформационных систем обоих классов (формирующих решения в виде оценок изображений или оценок его параметров) общая идея состоит в доставке получателю *минимального количества информации при максимальном её качестве*. Эта теоретическая задача на практике часто модифицируется к виду

«минимум количества информации при требуемом качестве информации», обеспечивающем достижение цели космического полёта (королёвское *«хоть одним глазком взглянуть»*) [40]). Эта концепция отвергает часто встречаемое понимание техники связи, выражаемое тезисом «чем больше информации – тем лучше», так как такое упрощённое понимание информации абстрагируется от наличия в любом сигнале не только полезной, но и фоновой (в том числе шумовой) информации, и исходит из необоснованного отождествления понятий «информация» и «польза».

Особенностью теории телевидения является необходимость учёта нескольких источников шумов – фотонных, считывания с фотоприёмника и радиоканала. Такая многозвенная модель системы традиционно требует привлечения методов как теории информации, так и теории решений (или, как её часто называли, теории оптимального приёма). Попытки преодоления разобщённости этих теорий предпринимались давно, в частности отмечалось, что *«потребность проектирования систем космического телевидения также нуждается в преодолении этой разобщённости»* [1, с. 64]. Основным результатом на этом пути стал принцип доминантной информации [79], позволивший ввести понятия доминантной, фоновой и шумовой информации и сформулировать основные законы кодирования (можно сказать – совместных приёма и передачи) зашумлённых сигналов [36].

Методологическое единство формирования, передачи и компьютерной обработки информации согласно принципу доминантной информации определяется необходимостью максимального подавления фоновой и шумовой информации при возможном сохранении доминантной информации. Эту идею можно трактовать как потребность радикального *сжатия сигналов*, часто на много порядков, например, при переходе от пространственно-временных координат каждого из фотогенерированных электронов в фотоприёмнике к азимуту на обнаруживаемый на сложном фоне объект. При этом становится не принципиальным, какой этап рассматривается – кодирование в фотоприёмнике или в цифровом кодере, на основе какой из теорий ведётся проектирование – теории информации или теории решений. При этом традиционные для теории информации и кодирования операции кодирования источника можно рассматривать как кодирование источника в узком смысле, а сжатие информации в ходе обнаружения объектов и

подавления фоновой информации – как кодирование источника в широком смысле.

Переход при сжатии в цифровом коде от методов теории информации к методам теории решений (от сжатия в узком смысле к сжатию в широком смысле) определяется как целью системы, так и априорной информацией о передаваемом сюжете. Так как априорная для синтеза информация является плодом анализа, то эти два этапа проектирования тесно связаны. Эта связь обусловлена тем, что статистический синтез возможен только при наличии *опорной триады*, включающей априорную информацию, критерий качества и ограничения (рис. 2.1.2).

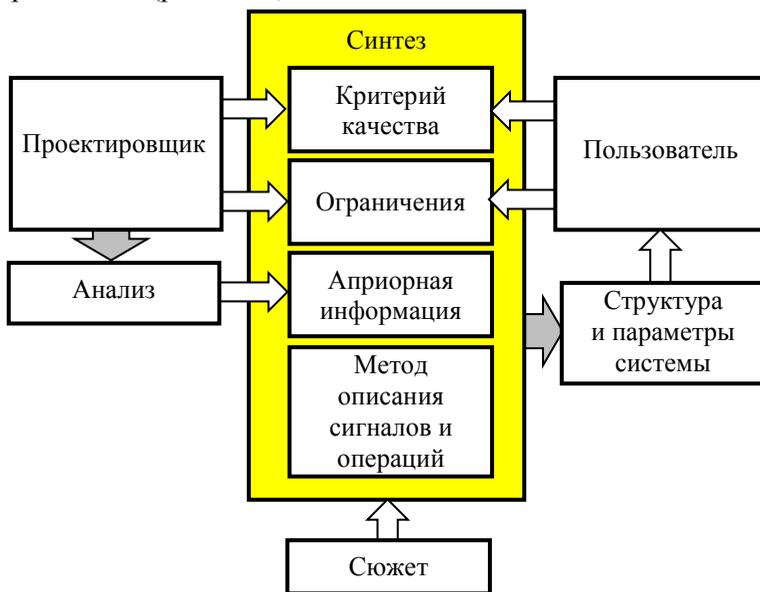


Рис. 2.1.2. Взаимосвязь анализа и синтеза системы

При этом на анализ возлагаются задачи определения априорной информации для конкретной проектируемой системы. Естественно, что в ходе анализа и синтеза следует использовать один и тот же наиболее удобный в конкретном случае вид описания из трёх классических:

- во временной области, когда случайные сигналы определяются автокорреляционными (АКФ) и взаимно-корреляционными (ВКФ) функциями, фильтры – импульсными характеристиками;
- во временной области, когда случайные сигналы и фильтры определяются дифференциальными или разностными уравнениями;

- в спектральной (частотной) области, когда случайные сигналы определяются своими энергетическими спектрами, а фильтры – своими амплитудно-фазовыми характеристиками передачи.

Синтез мы охарактеризуем в несколько этапов, в зависимости от объекта (ТВ камера или цифровой кодек) и от метода сжатия доступной информации (кодировании источника в узком или широком смысле, на основе теории информации или теории решений).

Процесс извлечения информации из потока фотонов, входящих на входной зрачок объектива ТВ камеры, характеризуется повышением качества информации [36], [76]. Качество информации связано с целью системы и по мере приближения к цели наращивается за несколько этапов. Эти этапы можно трактовать как переходы от *синтаксической* меры информации к *семантической* и от неё – к *прагматической* [253]. В теории проверки гипотез эти этапы разделяются в соответствии с переходами от наблюдения к *минимальной достаточной* статистике, а от неё – к решению; в теории распознавания образов этим этапам соответствуют переходы от наблюдения к признакам, а от них – к решению. Мы будем рассматривать эти переходы как последовательное сжатие (кодирование источника в широком смысле) с целью повышения качества информации, понимаемого как отношение количеств целевой информации и передаваемой.

Радикальное повышение качества информации за счёт сокращения (устранимой) избыточности можно проиллюстрировать на примерах звёздного датчика [88], селектора движущихся целей (СДЦ) [89] и системы контроля стыковки космических аппаратов (КА) [62]–[64], для которых с целью удобства сравнения положены одинаковая чёткость фотоприёмной матрицы 1 Мп, одинаковая кадровая частота 8 Гц [88] и одинаковая плотность потока фотонов 10^8 фотонов/кадр (при произвольных сюжетах учёт конечной ёмкости пиксела даёт оценки 10^{10} фотонов/кадр). Приняв для простоты потенциальную точность измерения координат каждого из фотогенерированных электронов 1 пиксел, получим (табл. 2.1.1), что доступный измерению поток фотонов характеризуется информацией примерно 2×10^9 бит/кадр.

Методы оптимизации поэтапного сжатия несколько различны в зависимости от целей системы и имеющейся априорной информации. Для некоторых примеров космических систем они сведены в табл. 2.1.2.

Таблица 2.1.1. Этапы сжатия сигналов

Система Информация	Звёздный датчик	СДЦ	Контроль стыковки КА
	бит/кадр		
на выходе ФПУ	2×10^9	2×10^9	2×10^9
на выходе АЦП (синтаксическая)	14×10^6	10×10^6	10×10^6
оценка параметров (семантическая)	2×10^3	6×10^3	50
на выходе системы (прагматическая)	40 (ориентация КА)	40 (азимут на КА)	50 (азимут и дальность до КА)

Таблица 2.1.2. Теоретические методы проектирования

Теория		Теория информации	Теория оценивания	Теория проверки гипотез
Объект		Оптимальное число пикселей и битов	Оптимальное соотношение пиксела и ФРТ ¹	–
ТВ камера		Оптимальное усечение числа спектральных компонент	Оптимальный размер зоны анализа	Обнаружение смены сюжета
Астродатчик (ТВ камера плюс вычислитель)		Оптимальное число пикселей и битов	Оптимальное время кадра по смазу	Обнаружение звёзд
Система контроля сближения	Минимизация промаха	Оптимальное число битов	Оптимальное время кадра по смазу	Обнаружение объектов на сложном фоне
	Адаптация параметров разложения	Оптимальное соотношение чёткости и кадровой частоты	Оптимальные статистики и их допустимые интервалы	Обнаружение принадлежности статистики к оптимальному интервалу

Сравнение показывает, что каждый из рассмотренных этапов сжатия повышает качество информации примерно на два–три порядка.

Даже если исходить из дискретного характера преобразования оптического сигнала в электрический, большое число фотогенерированных электронов в пикселях и кадрах определяет

¹ ФРТ – функция рассеяния точечного источника объективом.

целесообразность использования непрерывных моделей сигналов при проектировании ТВ камер и дискретных моделей при проектировании цифровых кодеров и устройств принятия решений.

Здесь мы, в соответствии с принципом доминантной информации [79], развиваемым научной школой НИИ телевидения [35]–[37], [75]–[78], [90]–[92], говорим о максимизации *качества информации* в ходе обработки телевизионного изображения. Для корректного применения этого понятия его следует сравнить с широко используемым понятием *качества изображения*. Качество изображений интересовало исследователей с момента зарождения оптики как науки, и формализацию качества оптического изображения можно вести от лорда Рэлея [93], [94], сформулировавшего *критерий качества*, отражавший требования к оптической системе, которая, в частности, в интересах астрономии, должна иметь функцию рассеяния точки, ограниченную только дифракцией.

Особо пристальное внимание к качеству оптического изображения характерно для середины XX века, когда оптические методы широким фронтом вошли в научные исследования и оборонную технику [93], [94]. Этот процесс сопровождался формулировкой множества критериев качества изображений, которые подразделяются на теоретические (Рэлея, Фуко, информационный) и эмпирические (Шадэ, Штреля, Линфута) [94]. Несколько позже, в начале второй половины XX века проблема оценивания качества изображений возникла в телевидении, и вопрос о критерии качества обострился.

Первый этап развития критериев качества телевизионного изображения относится к аналоговому телевидению. Для этого этапа характерна тенденция конструирования множества критериев, претендующих на обобщённость с попыткой охвата множества показателей качества [95], [96] (с множеством весовых коэффициентов при этих показателях, называемым *вектором концепции системы*). Согласно этому направлению *«общий закон построения интегрального критерия оценки качества воспроизведения может быть записан в виде, учитывающем сумму показателей цветности, объёмности, размера, яркости, контраста, чёткости, резкости, воспроизведения контуров и градаций яркости, равномерности и чистоты фона, воспроизводимости и мелькания, чувствительности получателя к изменению каждого параметра»* [96]. Самым крупным течением в этом научном направлении было создание методологии телевизионных измерений этой большой совокупности показателей с опорой на испытательные таблицы [97]–[99].

В теоретическом плане наибольшей концептуальной ясностью обладал информационный критерий [100]–[102], который по сути отождествил качество изображения с количеством информации в нём.

В эпоху цифрового телевидения стремление к экономии полосы частот, как одного из наиболее дефицитных ресурсов, приводит разработчиков к чрезмерному сжатию изображений, соответствующему превышению энтропии источника (ТВ камеры) над отпускаемой пропускной способностью. Это породило множество критериев качества изображений и видеопоследовательностей [103]–[107]. Можно удивиться – откуда такое множество? Дело в том, что, хотя анализ и синтез систем связи, и телевидения в частности, тяготеет к математике, но выбор критерия – не математическая проблема. Кроме того, предпосылкой разнообразия критериев являются:

- множество моделей систем (с устройством отображения и без него; монохромные, цветные, многоспектральные; с учётом фотонного шума и без него; одно- и многоакурсные; линейные и нелинейные);
- множество моделей сигналов (стационарные и нестационарные; статические и динамические; монохромные, цветные, многоспектральные);
- множество векторов концепции системы (акцент на сложность кодера или декодера; значимость потери информации, сложности кодера или пропускной способности).

Это множество критериев объединяет стремление сформулировать критерий в такой форме, которая допускала бы его применение, как на этапе *проектирования* системы, так и на этапах её *испытаний* и практического использования [94]. Такая тенденция, в частности, отдаёт предпочтение информационному критерию, который даёт лучшую связь с визуальными оценками качества, чем критерий Шадэ (связавшего качество с эквивалентной полосой частот сигнала) или исторически традиционным, но несколько субъективным критерием разрешающей способности (связанным с граничной полосой частот), в силу монотонной зависимости с дешифрируемостью объектов (требуемым масштабом объектов) [94].

Критерии качества изображения в приложении и к телевизионному вещанию, и к прикладным системам часто конструируют с проверкой их корректности путём сравнения с субъективной оценкой, и даже встречаются концепции «изображение должно быть лучше оригинала» [99]. При этом не теряет популярности создание

гибридных критериев, включающих некую (иногда аддитивную, иногда мультипликативную; либо с абсолютными, либо с нормированными значениями) комбинацию многих показателей качества изображения [95]–[97], [103]–[106].

Для дальнейшего рассмотрения особый интерес представляет информационный критерий [100]–[102], для которого характерно утверждение [100], [101]: *«мера качества должна учесть и разрешающую способность, и отношение сигнал/шум»*. Варианты информационного критерия используют не спектральное отношение сигнал/шум, а спектральную зависимость порога различения контраста [93]. Подчёркивание значимости отношения сигнал/шум важно потому, что встречаются весьма странные утверждения, отрицающие влияние шума на качество изображения: *«чем выше качество восстановления сигналов, тем больше их зашумлённость»* [107].

Отмечается также, что желательно связать качество изображений с дешифрируемостью (семантикой, что анализировалось позже в [94]), но *«устранение семантики – это та цена, которую проектировщики обязаны заплатить, чтобы воспользоваться методами теории информации»* [101]. Важно, что обобщённый (информационный) критерий *«является оценкой сверху (без учёта корреляционных связей изображения) скорости передачи информации. Он монотонно связан с субъективной оценкой»* [94].

Субъективность оценки качества изображения является следствием определяющей роли получателя в модели системы связи. Вместе с тем следует задать вопрос: что *передается по каналу связи – изображение или информация* о нём? Если признать, что информация, то, никоим образом не отвергая понятия *качества изображения*, которое важно для системы связи в целом, при проектировании канала связи должен возникнуть вопрос об *измеримом качестве информации*, оцениваемом с позиций принципа доминантной информации и принципа накопления качества информации [36], [79].

Мы делаем акцент на измеримом качестве информации в противовес тенденции оценивать качество изображения экспертным методом. Развиваемая нами концепция позволяет количественно сравнивать искажённые разными причинами передаваемые сигналы изображений (напр., [36, с. 72]). Вместе с тем общая идея теории связи о том, что без получателя нет информации, требует участия человека в синтезе системы, оценке качества информации при эксплуатации и тестировании, то есть неизбежна некая мера субъективности в оценке качества информации. Эта «смычка»

объективности и субъективности в развиваемой концепции содержится в критерии минимума информационного риска (2.1.5), в котором весовые коэффициенты при потере полезной информации c_0 и при шумовой информации c_1 (так же, как и весовые коэффициенты в критерии Байеса в теории решений) назначаются «из априорных соображений», то есть субъективно. Эта субъективность проявляется при проектировании любых видеоинформационных систем различного назначения. При этом проектировщики, даже не будучи вооружёнными теорией, интуитивно сопоставляют значимость потери доминантной информации и шумовой информации. Так, при передаче (записи в память) изображений для массового просмотра телефильмов допустимо сильное сжатие сигналов, для которого отношение весовых коэффициентов c_0/c_1 имеет порядок 1 и менее; профессиональные записи более требовательны к качеству и для них характерно отношение весовых коэффициентов c_0/c_1 в несколько раз больше 1; для научных исследований, например, в астрономии, значение потери доминантной информации столь велико, что принимаемые параметры квантования сигналов (не менее 2 байт/пиксел) приближаются к поштучному счёту фотоэлектронов и соответствуют на порядок большему весу потери доминантной информации по сравнению с весом шумовой информации.

Ниже, (см. раздел 2.3) поиск максимума качества информации иллюстрируется на простом варианте критерия идеального связиста (2.1.6) без загромождения изложения обсуждением вариаций весовых коэффициентов при потере полезной информации и при шумовой информации. Вместе с тем, в каждой конкретной системе – ТВ камере и цифровом кодере – проектировщик устанавливает пороги квантования отсчётов ТВ сигналов или спектральных трансформант предполагая конкретное соотношение c_0/c_1 : чем меньше это значение, имеющее смысл *порогового отношения* сигнал/шум, тем грубее квантование. Но целью приводимого в разделе 2.3 рассмотрения концепции качества информации является не точное определение параметров дискретизации и квантования, а иллюстрация наличия максимума качества информации. Хотя координаты этого максимума и зависят от соотношения весовых коэффициентов при потере полезной информации и при шумовой информации, принципиальным является отход от старых представлений «чем меньше освещённость, тем хуже», «чем меньше уровней квантования, тем хуже», «чем больше скоростной смаз, тем хуже», и переход к новой парадигме оптимизации систем передачи информации по максимуму качества информации.

Информационную теорию разделяют на синтаксическую, семантическую и прагматическую. При этом математическая теория связи К. Шеннона – теория синтаксической информации; он подчёркивал [85, с. 243], что *«Часто сообщения имеют значение, т. е. относятся к некоторой системе, имеющей определённую физическую или умозраительную сущность... Эти семантические аспекты не имеют отношения к технической стороне вопроса»*.

Вместе с тем практика предъявляет к информации – будь то семантическая, прагматическая или синтаксическая – требования не только по количеству, но и по качеству. Например, ряд работ (к примеру [253]) опирается на различные *показатели качества информации*, как применимые, так и не применимые к синтаксической информации: полезность, содержательность, актуальность, своевременность, достоверность, точность, доступность, адресность, скрытность и т. п.

Теория синтаксической информации в явном виде не содержит понятия качества информации, востребованного, в первую очередь, потребностью информационной оценки систем передачи *зашумлённых сигналов*, из-за чего возникали курьёзные ситуации. Например, появление странной для практиков теоремы Н. Винера о том, что *«кодирующая система может уменьшить, а в лучшем случае сохранить имеющуюся информацию о зашумлённом сигнале»*. Это, конечно, не вело к отказу от обработки сигналов, но часто вело к отказу от использования теории информации, которую относили к слишком абстрактным и неконструктивным теориям и признавали за ней лишь обоснование некоторых границ. Для преодоления этого противоречия был сформулирован принцип доминантной информации [79], согласно которому информация (в том числе синтаксическая) разделяется по своему *качеству* на доминантную, фоновую и шумовую. Важным шагом в развитии концепции доминантной информации было выдвижение аксиомы повышения качества информации [35], согласно которой кодирование и декодирование сигналов, в том числе зашумлённых, имеет целью повышение качества доставленной получателю информации о доминантном сигнале, т. е. насыщение передаваемой информации доминантной информацией и подавление фоновой информации [79], которое проиллюстрировано в табл. 2.1.1.

Ниже идея повышения качества синтаксической информации развивается в части обоснования принципа максимума качества информации [90], утверждающего: система связи должна доставлять получателю (человеку или автомату) информацию максимального

качества при том, что её количество минимизируется усечением некачественной информации.

Рассмотрим основную теорему Шеннона для *дискретного канала* с шумом и его комментарии к ней [85, с. 281]. Шеннон ввёл понятие условной энтропии отправляемого сигнала x при наличии полученного сигнала y и «для удобства» назвал её ненадёжностью канала [85, с. 277] (*equivocation*, что, как отмечает редактор перевода [85], переводится иногда в русской литературе как «неопределённость»). Ниже будем «для удобства» рассматривать эту величину как потерю доминантной информации ΔI_C , обусловленную ограниченностью пропускной способности канала.

Обсуждая понятие энтропии источника H , Шеннон ввёл понятие избыточности, определив её через относительную энтропию, т. е. через отношение энтропии источника H к максимальной энтропии при выбранном алфавите $H_{\text{макс}}$: «единица минус относительная энтропия есть избыточность» [85, с. 267], – и отметил, что избыточность определяет максимальное сжатие. Для наших целей полезно опереться не на относительную избыточность, а на избыточную (фоновую) информацию $I_{\text{ф}}$, т. к. это позволяет конструировать *критерии* качества, объединяющие причины потери качества информации – потерю информации, т. е. ненадёжность канала, и загрузку канала любой, отличной от доминантной, информацией. К недоминантным компонентам относится и фоновая, и шумовая информация, отличие между которыми принципиальное: фоновая информация *потенциально* может быть сведена к нулю, а шумовая информация в силу *закона* взаимнообмена [36] может лишь обмениваться на потерю доминантной информации. Это означает, что введение понятия шумовой информации обобщает понятие избыточной информации, включая в неё не сводимую к нулю компоненту.

Для количественной оценки качества информации введём понятие информационного риска R_C для передачи исходного сигнала, определяющего *качество кодирования* и включающего *избыточную* информацию $I_{\text{ф}}$ (характеризующую неполноту загрузки канала и *определяемую* «для удобства» как разность между пропускной способностью канала и энтропией источника) и потерю доминантной информации ΔI_C [90]. Эти две компоненты информационного риска согласно основной теореме Шеннона для дискретного канала с шумом соответствуют ситуациям:

- $H > C$ (имеется потеря доминантной информации ΔI_C , соответствующая «ненадёжности» канала);

- $H < C$ (из-за отсутствия сжатия сигнала имеется фоновая информация I_{ϕ} тем большая, чем больше избыточность канала);
- $H = C$ (информационное равновесие, при котором благодаря оптимальному сжатию $\Delta I_C = 0$, $I_{\phi} = 0$).

В общем случае информационный риск, как и средний (байесовский) риск в теории решений включает весовые коэффициенты при входящих слагаемых, но в простейшем случае информационный риск имеет вид:

$$R_C = \Delta I_C + I_{\phi}. \quad (2.1.1)$$

Качество информации можно определить по-разному; научной школой НИИ телевидения развивается концепция качества как **отношения энтропии источника к информационному риску**. У этого, вообще говоря, произвольного определения есть аналогия: в теории решений качество оценки определяется отношением дисперсии оцениваемого случайного процесса к среднему риску (среднеквадратической ошибке) [115, т. 1. с. 750]. Здесь уместно напомнить, что теория техники, конечно, пользуясь достаточно простым математическим аппаратом [127], тяготеет не к математике, а к физике. Не говоря о том, что «математик не вздрогнет» от понятия «бесконечность», важно, что, например, в квантовой физике уживаются несколько методов (формализмов) описания физических процессов (Э. Шрёдингера, В. Гейзенберга и П. Дирака – Р. Фейнмана), каждый из которых применяется в зависимости от специфики задачи. Эту ситуацию Э. Зи в послесловии к книге Р. Фейнмана [119] комментирует так: *«Физики-теоретики чрезвычайно прагматичны. Они всегда пользуются самым простым методом. В них нет ничего от приверженности математиков высоким стандартам строгости доказательств. Всё, что работает, годится!»*.

В разделах 2.3, 2.4 мы покажем, «как работает» введённое нами определение качества синтаксической информации при параметрическом синтезе кодера источника.

Учитывая, что и фоновая (избыточная) информация и потеря доминантной информации (ненадёжность) определяются разностью энтропии источника и пропускной способности, получим [90]:

$$Q_C = \frac{H}{R_C} = \frac{H}{|H - C|} \quad (2.1.2)$$

При этом при всех соотношениях энтропии H доминантного сигнала и пропускной способности C количество передаваемой доминантной информации составляет

$$I(x, y) = \min\{H, C\}.$$

Зависимость качества информации от соотношения энтропии H и пропускной способности C (рис. 2.1.3) характеризуется разрывом в точке информационного равновесия $H = C$.

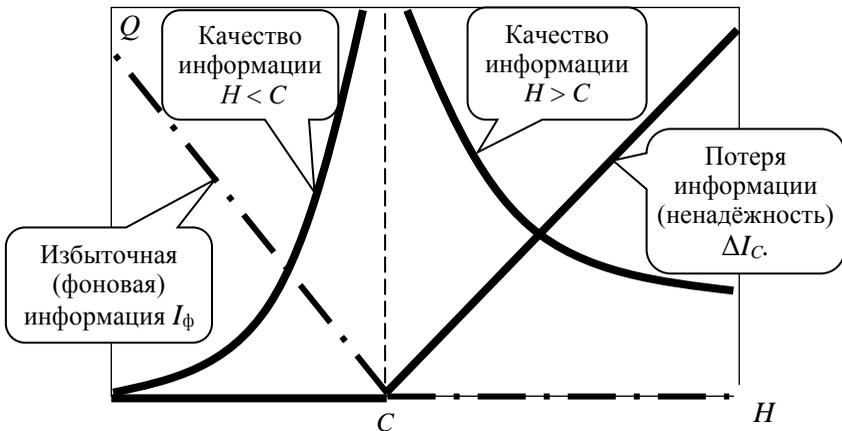


Рис. 2.1.3. Зависимость компонент информационного риска и качества информации от соотношения энтропии источника и пропускной способности канала

Этот разрыв, обусловленный лишь потенциальной достижимостью равенства энтропии и пропускной способности, имеет три проявления: в бесконечность обращаются не только отмеченные К. Шенноном сложность и задержка, но и качество информации (2.1.2).

К. Шеннон построил график достижимой области надёжности в зависимости от соотношения энтропии источника и пропускной способности [85, с. 288], т. е. допускал их любое соотношение, но формулировка его теорем подразумевает *стремление* приблизиться к равенству энтропии источника и пропускной способности, которое возможно при *сколь угодно малой ненадёжности*. При этом он отмечал [85, с. 409], что «*скорость C не может быть в действительности достигнута; к ней можно только приближаться в пределе, используя всё более и более сложные способы кодирования и при всё большем запаздывании в работе передатчика и приёмника*». Это означает, что бесконечность качества в формуле (2.1.2) при передаче неискажённых сигналов может быть лишь потенциальной, а не актуальной.

Более того, информационное равновесие К. Шеннон возводил в идеал, отмечая [85, с. 451]: «Будем называть систему, обеспечивающую передачу без ошибок со скоростью C , идеальной системой. Такая система не может быть осуществлена ни при каком конечном процессе кодирования, но к ней можно приблизиться настолько, насколько это желательно». Здесь уместно замечание: уравнение связи [78] принципиально отличается от теорем Шеннона строгим равенством энтропии источника и пропускной способности, без оговорок про сколь угодно малую ненадёжность. При этом важно, что для ряда распределений сигнала оказалось, что решений уравнения связи, т. е. систем, обеспечивающих информационное равновесие с равенством $H = C$, а не с приближением к нему, оказалось очень много. При этом среди решений оказались и дискретные, и непрерывные, и смешанные каналы связи [36].

Формализация качества информации (2.1.2) даёт простую трактовку позиции К. Шеннона: *идеальная система передаёт информацию максимального, в пределе – бесконечного качества.*

Основная идея при передаче непрерывных сигналов состоит в том, что [85, с. 315]: «практически при непрерывном источнике нас интересует не точная передача, а передача с определённым допуском». Эта идея привела к понятию «эквивалентной скорости» $R(d)$ (*coding with a fidelity criterion, rate distortion*) [85, с. 587] или тождественному термину эpsilon-энтропия H_ϵ [86]. С точки зрения концепции качества информации переход к эpsilon-энтропии не меняет формулы (2.1.2), в которую теперь подставляется не энтропия H , а эpsilon-энтропия H_ϵ , и качество может быть бесконечным, хотя и весьма условно – остаётся произвол в назначении «заданной» ошибки ϵ .

Иная ситуация складывается при передаче зашумлённых сигналов (а таковы все телевизионные сигналы): центральная проблема связи – равновесного согласования источника и канала – усложняется. Здесь обойтись *только* одним понятием взаимной информации не удаётся. И учитывая, что информация не является скалярной величиной, следует найти конструкцию, лучше отражающую *интересующую нас информацию.*

Теория кодирования зашумлённых сигналов в телевидении применяется в ходе синтеза ряда узлов, в первую очередь это параметрический синтез, позволяющий найти оптимальные параметры фотоприёмника ТВ камеры и цифровых кодера источника и кодера канала.

Ключевым моментом теории кодирования зашумлённых сигналов является *аксиома априорного равноправия сигналов* различной природы и источников [35]–[37], [77], [79]:

Существует взаимная информация между выходным сигналом и любой из компонент входного воздействия системы связи – доминантным сигналом, фоновыми сигналами и шумами.

Следствием из аксиомы априорного равноправия является то, что в простейшей модели видеоканала получателю предъявляется прошедшая канал связи кодированная смесь доминантного сигнала и входного шума (*доминантный сигнал на фоне шума*). Получатель имеет дело не только с доминантной информацией, но и с информацией $I_{\text{ш}}$, характеризующей входной шум, т. е. с *шумовой информацией*.

В данном случае шумовую информацию целесообразно рассматривать как взаимную информацию между входным шумом и суммой шумов в выходном сигнале, доступном получателю. В [33] она определена как разность доступной информации (взаимной информации $I(y, z)$ между искажённым шумом сигналом y и получаемым сигналом z) и доминантной информации (взаимной информации $I(x, z)$ между доминантным сигналом x и получаемым сигналом z):

$$I_{\text{ш}} = I(y, z) - I(x, z). \quad (2.1.3)$$

Важным свойством систем передачи зашумлённых сигналов является то, что уменьшение потери доминантной информации может быть достигнуто только ценой передачи большего количества шумовой информации. Для ошибок передачи, незначительно превышающих предельную ошибку фильтра Винера, между потерей доминантной информации и передачей шумовой информации существует *закон взаимобмена* [34]:

$$\Delta I \cdot 2^{2I_{\text{ш}}} \approx 1, \quad (2.1.4)$$

показывающий бесконечный рост шумовой информации при стремлении к передаче с предельной ошибкой, обеспечиваемой фильтром Винера. В результате при стремлении к минимальной ошибке потребуется бесконечная полоса кодера, которая будет тратиться на передачу в основном шумовой информации. Это положение обострило вопрос о качестве информации и стимулировало выдвижение *аксиомы повышения качества информации* [35]–[37], [77], [79]:

Кодирование и декодирование сигналов (в том числе зашумлённых) имеет целью повышение качества доставленной получателю информации о доминантном сигнале.

На несемантическом уровне качество информации определить проще, чем на семантическом уровне, поскольку априорной целью системы связи является передача получателю информации максимального качества при том, что её количество минимизируется путём усечения некачественной информации.

Наличие различных видов информации подсказывает, что раз количество информации можно только уменьшить, то и нужно максимально подавить информацию о мешающих сигналах (о шуме) при минимальной потере информации о доминантном сигнале.

В [35] определено два подхода к понятию категории качества:

- *качество кодирования* (передачи информации) – то, как кодер использует входную информацию;
- *качество доставленной получателю информации* – то, насколько полученный код при минимизации количества информации соответствует состоянию источника.

Для оценки *качества кодирования* введено понятие информационного риска и сформулирована аксиома:

Информационный риск определяется взвешенной суммой потерянной информации о доминантном сигнале и полученной информации об остальных компонентах входного воздействия.

Введением этой аксиомы сделан решительный отход от концепции идеального связиста, предписывающей нулевую ошибку передачи при ненулевой ошибке в доступном сигнале.

И если в теории решений оптимальная стратегия имеет целью минимизацию среднего риска, состоящего из взвешенной вероятности ошибок принятия альтернативных гипотез, то в теории кодирования зашумлённых сигналов *оптимальная стратегия* состоит в *минимизации информационного риска*, состоящего из совокупности разнородных информационных величин. Вероятность – это скалярная величина, не позволяющая при использовании ошибок только одного рода (напр., пропуск цели и ложная тревога) определить оптимальную стратегию принятия решения. Возникающая при этом неопределённость преодолевается только введением вектора из двух показателей различных видов ошибочных решений. Аналогичным образом и информационный экстремум может быть найден путём введения вектора, состоящего из двух видов информации (подробнее см. [36]).

Согласно аксиоме, оптимизация кодирования зашумлённых сигналов должна использовать *критерий минимума информационного риска* [35]–[37], [77], [79], который определяется взвешенной

суммой потери информации о доминантном сигнале и шумовой информации:

$$R_n = c_0 \Delta I + c_1 \Delta I_{\text{ш}}. \quad (2.1.5)$$

Весовые коэффициенты в критерии минимума информационного риска, так же, как и в критерии Байеса, отражают отношение получателя к ошибкам различного рода. В варианте равенства цен потери доминантной информации и загрузки канала шумовой информацией $c_0 = c_1 = 1$ развитая концепция приводит к следующему информационному критерию:

$$R_n = \Delta I + \Delta I_{\text{ш}}. \quad (2.1.6)$$

Критерий (2.1.6), по аналогии с идеями В. К. Зворыкина и критерием достаточности точности академика А. Н. Крылова, может быть назван *критерием экономного связиста* [37]. Методологическое значение критерия достаточно велико, поскольку он аналогично критерию идеального наблюдателя Котельникова–Зигерта *уравновешивает* потерянную информацию о доминантном сигнале и дошедшую до получателя шумовую информацию *при равенстве их цен*.

Критерии (2.1.5) и (2.1.6) позволяют определить оптимальные значения полной ошибки ε передачи зашумлённого сигнала, обеспечивающие компромисс между потерей информации и передачей шумовой информации, выражаемые через значение ошибки $\varepsilon_{\text{в}}$ оценки сигнала, формируемой фильтром Винера. Для критерия (2.1.6) минимум информационного риска достигается при условии равенства ошибок передачи, вызванных входным шумом и шумом канала, т. е. $\varepsilon = 2\varepsilon_{\text{в}}$. Чем больше вес потери доминантной информации в критерии (2.1.5) по сравнению с весом шумовой информации, тем ближе оптимальное значение ошибки к потенциальному значению $\varepsilon_{\text{в}}$.

Качество переданной информации о зашумлённом сигнале перестаёт быть неопределённой величиной, а зависит не только от оптимизации кодера, обеспечивающего информационное равновесие ($H_\varepsilon = C$), но и от значения спектрального отношения сигнал/шум на входе системы. Как и в теории оценивания, где качество решения представляют в виде нормированного среднего риска (нормированной среднеквадратической ошибки), качество переданной по каналу связи информации должно оцениваться *нормированным информационным риском*, или обратной величиной. В этом случае качество переданной через канал связи информации о зашумлённом сигнале следует определять через отношение количества

потенциальной информации $I(x, y)$ к информационному риску. Воспользовавшись результатом в виде критериев (2.1.5) и (2.1.6) можно корректно подойти к количественной оценке качества несемантической информации, которая сформулирована в виде следующей *аксиомы* [35]–[37]:

Качество информации определяется отношением потенциальной доминантной информации к информационному риску.

Следствием будет то, что при кодировании случайных гауссовых величин (например, одномерных видеосигналов) при вариации ошибки передачи *существует максимум качества информации*, достигаемый одновременно с минимумом информационного риска.

Поскольку по критерию (2.1.6) этот максимум достигается при $\varepsilon = 2\varepsilon_B$, т. е. при равенстве ошибок из-за входного шума и шума канала, то при кодировании случайных процессов в соответствии с уравнением связи находится идеальное кодирование ($H_\varepsilon = C$), причём качество информации вычисляется как [36], [37], [77]:

$$Q_n = \frac{I(x, y)}{R_n} = \frac{I(x, y)}{c_0 \Delta I + c_0 \Delta I_{ш}}; Q_n = \frac{\sum_{k=1}^K I(x_k, y_k)}{\sum_{k=1}^K R_{I_k}}. \quad (2.1.7)$$

Исходная смесь доминантного сигнала и шума при бесконечных спектрах этих случайных процессов, когда в выражении (2.1.7) $K \rightarrow \infty$, в силу конечного количества доминантной информации и бесконечного количества шумовой информации характеризуется *нулевым качеством информации*.

В силу неразрывной слитности доминанты и фона (даже при максимизации качества информации), в переданной информации неизбежно будет присутствовать некоторое количество шумовой информации. При этом максимум качества полученной информации находится из уравнения

$$dQ(K)/dK = 0 \rightarrow K_0 = \arg \max_K Q, \quad Q_{\max} = Q(K_0), \quad (2.1.8)$$

которое показывает, что *существует идеальное линейное кодирование, доставляющее получателю информацию максимального качества при оптимальном усечении спектра сигнала K_0* . Следовательно, при усечении спектра зашумлённого сигнала с оптимальными параметрами канала шумовая информация будет подавлена в существенно большей степени, чем доминантная. Решение 2.1.8 показывает, что усечение должно производиться по пороговому

отношению сигнал/шум, равному для критерия минимума информационного риска (2.1.5) c_1/c_0 , а для критерия (2.1.6) – 1. Это означает, что введение понятия шумовой информации дало новую информационную трактовку широко применяемому в теории решений понятию «пороговое отношение сигнал/шум»: порог определяется назначаемым проектировщиком отношением цен шумовой информации и потери доминантной информации.

Сокращение полосы частот относительно K_0 ведёт к снижению качества информации из-за излишних потерь доминантной информации, а расширение полосы частот снижает качество информации из-за загрузки канала и получателя шумовой информацией. Это означает, что при выполнении условий максимума качества информации и идеальном кодировании *зашумлённых* сигналов ($H_\varepsilon = C$) *назначаемая ошибка ε и ограничение широкополосности («площади усиления») кодера не могут назначаться произвольно.* Чем больше входное отношение сигнал/шум, тем бóльшая широкополосность кодера требуется для обеспечения максимального качества передаваемой информации. Применение принципа доминантной информации, ведущего к учёту качества информации при кодировании зашумлённых сигналов, даёт обоснование *оптимального усечения полосы частот непрерывных сигналов* и конкретные правила для вычисления характеристик кодирующих и декодирующих фильтров. В рамках теории связи и телевидения эти результаты формализуют фундаментальные закономерности *формирования и передачи* сигналов в реальном масштабе времени и позволяют обосновать использование функций с финитным спектром, введённым в теорию связи В. А. Котельниковым и К. Шенноном, но не как априорной данности, а как плода *оптимального кодирования: оптимальная финитная полоса частот определяется максимумом качества информации* о зашумлённом доминантном сигнале (подробнее см. [37], [77], [79]).

Теория кодирования зашумлённых сигналов для гауссовских процессов при использовании разложения Карунена–Лоэва и информационном равновесии (фоновая информация I_f равна нулю) привела к определению качества информации Q_n , лимитируемого входным шумом, которое с учётом формул (2.1.6) и (2.1.7) можно записать в виде:

$$Q_n = \frac{H}{\Delta I + I_{ш}}. \quad (2.1.9)$$

Важным выводом теории кодирования зашумлённых сигналов, использующей формулу (2.1.9), является закон о существовании нижней границы информационного риска R_n [36]: $\min R_n \approx 1$ бит/символ, и, как следствие, *верхней границы* (безразмерного) качества информации Q_n , численно равной энтропии H . Обобщение формул (2.1.2)–(2.1.9) позволяет определить предельное качество информации через сумму информационных рисков, обусловленных различием энтропии источника и пропускной способности R_C и влиянием входного шума R_n .

$$Q = \frac{H}{R_C + R_n} = \frac{H}{(\Delta I_C + I_\phi) + (\Delta I_n + I_\psi)}. \quad (2.1.10)$$

Формула (2.1.10) имеет следующие характерные точки: $Q = 0$ при $H = 0$; $Q = H$ при $H = C$; $Q = 1$ при $H/C \rightarrow \infty$. Количество *полезной* информации $I(x, y)$, как и при вычислении качества информации по формуле (2.1.2), не превышает пропускной способности. Предельное качество $Q = H$ потенциально достижимо при выполнении ряда условий, в том числе оптимального кодирования как с точки зрения подавления фоновой информации, т. е. $R_C = 0$, так и с точки зрения компромисса между потерей полезной информации и нагрузкой канала связи передачей информации о входном шуме, т. е. $R_n = 1$.

Для акцентирования внимания на близости понятий потери доминантной информации по различным причинам, а также потенциально устранимой фоновой информации и неустраняемой полностью шумовой информации, вместе образующих ложную информацию $I_n = I_\phi + I_\psi$ [79], формулу (2.1.10) можно записать в виде:

$$Q = \frac{H}{\Delta I + I_n} = \frac{H}{(\Delta I_C + \Delta I_n) + (I_\phi + I_\psi)}. \quad (2.1.11)$$

При кодировании зашумлённых сигналов предельное значение качества информации (2.1.10) и (2.1.11) имеет конечное значение (рис. 2.1.4).

Максимум качества информации при кодировании зашумлённых сигналов, достигаемый оптимизацией кодера источника, при линейном кодировании – его спектральной характеристики, может быть абсолютным, если наложено условие информационного равновесия [36, с. 110], и относительным, не превышающем абсолютного, если не накладывается условие информационного равновесия (2.1.2) [36, с. 108].

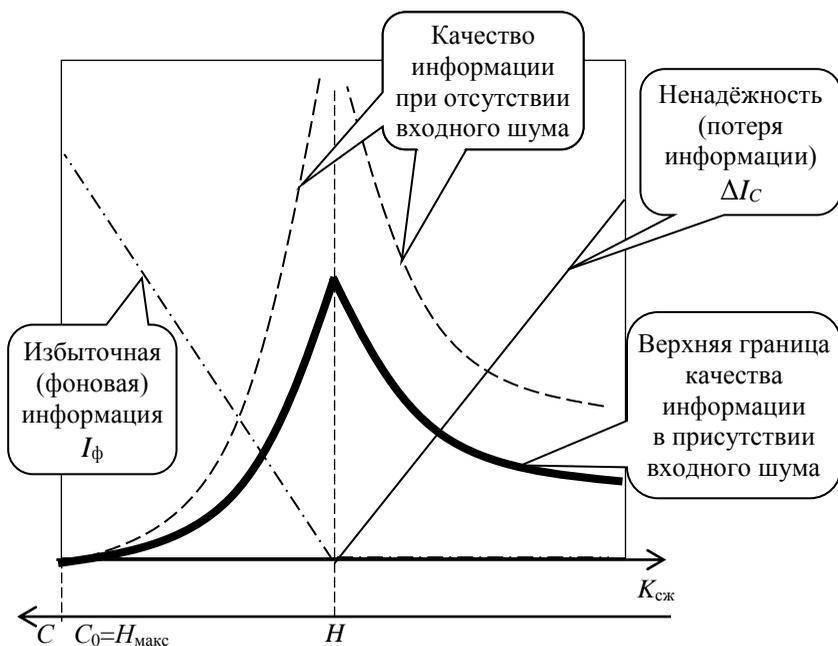


Рис. 2.1.4. Зависимость качества информации от соотношения энтропии источника H и пропускной способности канала C (нижняя шкала; максимум пропускной способности C_0 соответствует максимальной энтропии источника $H_{\text{макс}}$ при выбранном алфавите); шкала коэффициентов сжатия $K_{\text{сж}}$ относительно C_0 имеет противоположное направление

Концепция качества информации не только даёт важные конструктивные результаты для кодирования зашумлённых источников, но и даёт важную границу качества информации, которая может быть использована при проектировании кодеров канала. Доставленная кодером источника кодеру канала информация максимального качества должна быть им (с помощью декодера канала) передана получателю с минимальными, в пределе нулевыми, потерями качества информации. При этом недостаточно помнить, что «если не ограничивать мощность передатчика, то пропускная способность будет бесконечной даже в случае наличия шума... Только в случае, когда имеется шум и мощность передатчика некоторым способом ограничена, получается конечная пропускная способность. Пропускная способность зависит, конечно, от статистической структуры шума так же, как и от того, каким образом ограничена мощность» [85, с. 408]. Здесь мы не будем углубляться в вопрос о том, «каким образом ограничена мощность»,

подробно рассмотренный в [36]. Главным конструктивным элементом здесь является зависимость требуемой пропускной способности и, как следствие, значения накладываемого ограничения (в частном случае, использованном Шенноном для примера, – мощности на выходе кодера) от значения качества информации, поступающей на вход кодера канала [36]. При этом оптимизация кодера канала ведётся с целью достижения *минимума потерь качества информации* (часто эту идею упрощают до минимизации ошибок передачи) *при минимуме используемых энергетических ресурсов* в канале (см. раздел 2.5).

Таким образом, принцип максимума качества синтаксической информации (аксиома повышения качества информации) утверждает: целенаправленные преобразования сигналов имеют целью повышение качества информации вплоть до его максимума, достигаемого при равенстве скорости создания информации источником и пропускной способности канала связи. При этом измеримое качество синтаксической информации может быть определено как отношение количества полезной (доминантной) информации к информационному риску, включающему две компоненты: избыточную, то есть фоновую, информацию и потерю полезной информации (формулы (2.1.2), (2.1.10), (2.1.11)). Максимум качества синтаксической информации имеет бесконечное значение при передаче неискажённых дискретных сигналов (формула (2.1.2)) и конечное значение (формулы (2.1.9)–(2.1.11)) при передаче зашумлённых сигналов, т. к. для них информационный риск имеет ненулевую нижнюю границу в силу существования неустранимых компонент: потери доминантной информации и шумовой информации.

Концепция качества информации на новом по сравнению с концепцией энтальпии уровне формализует передачу сигналов при имеющихся неизбежных искажениях. Можно сказать, что теория энтальпии – это первое приближение к теории сжатия сигналов, концепция качества информации – второе, более полное приближение к теории сжатия информации. Классы систем, которые могут быть синтезированы на основе этой концепции, и её значение связаны с тем, что концепция качества информации:

- даёт единую методологию проектирования систем связи обоих классов – человек–человек и природа–человек, т. е. как *передачи*, так и *извлечения* доминантной информации при наличии фоновой и

шумовой информацией, т. е. охватывает не только передачу, но *рождение* сигналов, даёт инструмент проектирования и каналов связи, и источников информации (таких, как телевизионные камеры);

- устраняет важную «занозу» классической теории информации, каковой долго являлась странная для практиков популярная теорема Н. Винера о том, что «кодирующая система может уменьшить, а в лучшем случае сохранить имеющуюся информацию о зашумлённом сигнале».

- даёт методологию проектирования систем передачи (кодирования) искажённых сигналов при *любой* причине (модели) потери доминантной информации, включая топологические (дисторсии и проективные искажения в оптике), линейные преобразования (в т. ч. задержки сигналов в системах реального времени) и нелинейные преобразования (в т. ч. конечный динамический диапазон устройств преобразования сигналов);

- даёт обоснование введённых В. А. Котельниковым и К. Шенноном функций с ограниченным спектром не как априорной данности, а как плода достижения максимума качества информации о зашумлённом сигнале;

- устанавливает закон для максимального качества (минимального информационного риска) полученной информации о передаваемом зашумлённом сигнале;

- является дополнительным обоснованием уравнения связи [78], постулировавшего необходимость информационного равновесия, т. е. равенства скорости создания информации источником и пропускной способности канала: если бы уравнения связи не было, то принцип максимума качества информации потребовал бы его сформулировать.

Конечно, изложенная концепция имеет свои рамки: синтаксическая информация, даже с учётом её качества – это далеко не семантическая информация. Вместе с тем, важным аспектом изложенной концепции качества синтаксической информации является не только её принципиальное отличие от «технического» качества изображения в телевидении, но и принципиальный переход к *измеримому качеству информации после её сжатия* [90]–[92].

Анализ статистических свойств сигналов – формирование априорной информации для синтеза

Анализ диапазона изменения интенсивности светового потока от наблюдаемых сюжетов показывает, что в пределах одного кадра как в видимой области спектра, так и в инфракрасной, интенсивность

светового потока может изменяться на три–четыре порядка, в пределах сеанса наблюдения – на четыре–пять порядков, в пределах витка КА вокруг Земли даже без учёта возможности попадания Солнца в поле зрения – до восьми порядков (рис. 2.1.5).

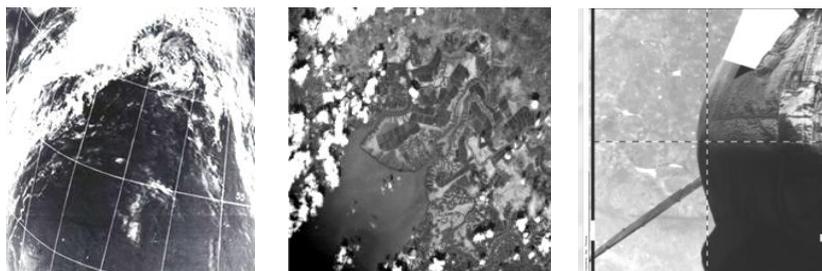


Рис. 2.1.5. Изображения, полученные из космоса, при оптическом контрасте более 4 порядков

С неопределённостью интенсивности светового потока телевизионная техника борется с помощью автоматической регулировки времени накопления (АРВН), автоматически регулируемой диафрагмы и автоматической регулировки усиления (АРУ) [33], хотя проблема *линейного* динамического диапазона в пределах одного кадра в космическом телевидении ещё далека от практического воплощения имеющихся идей [36]. Анализ видеосюжетов подробно проиллюстрируем на примере измерения их статистических характеристик по полю и по времени. Для каждой фоноцелевой обстановки (видеосюжета) характерны статистические свойства, имеющие своими аргументами пространственные координаты x , y (координата дальности, как правило, в видеоинформационных системах является результатом оценок параметров группы двумерных изображений, формируемых одной или несколькими ТВ камерами), время t и длину волны λ .

Оценки корреляционных функций изображений по полю (по вертикали и по горизонтали) проводились неоднократно [108], [109]. Однако оценки корреляционных функций видеопоследовательностей оставались в тени. Это (в общем-то, фундаментальное) различие пространства и времени определило различие подходов в анализе внутрикадровых и межкадровых статистик в семействе стандартов *MPEG*. Однако корректная методика статистического синтеза предполагает единство математического аппарата при оценке статистик многомерного поля по разным аргументам.

Разработчики алгоритмов кодирования проверяют эффективность их работы на некоторой выборке различных сюжетов,

негласно полагая, что эта выборка является представительной. Так как речь идёт о кодировании нестационарных сигналов, то для сравнения эффективности кодирования различных алгоритмов следует использовать следующую методику [110]:

- ввести меру нестационарности сигналов изображений;
- разработать алгоритм вычисления введённой меры;
- определить границы изменения этой меры для очень большой выборки сигналов (заведомо представительной);
- произвести разбиение интервала изменения этой меры на несколько (по возможности равных) интервалов, количество которых должно быть достаточным для уверенности в представительности выборки;
- отобрать изображения, принадлежащие к выделенным интервалам меры нестационарности;
- провести кодирование сформированной выборки каждым из исследуемых алгоритмов;
- для каждого алгоритма и для каждого элемента выборки оценить значения скорости передачи информации при заданной ошибке передачи (иногда возможна инверсия – оценить ошибку передачи при заданной скорости передачи);
- при отсутствии статистических данных о вероятностях появления сюжетов с различной мерой нестационарности считать их равновероятными;
- для каждого алгоритма усреднить по сформированной выборке значения скорости передачи при заданной ошибке (или усреднить ошибку передачи при заданной скорости передачи);
- сравнить результаты усреднения и выбрать алгоритм, обеспечивающий наименьшую скорость передачи при заданной ошибке (наименьшую ошибку при заданной скорости передачи).

Для реализации такой методики ключевыми вопросами становятся первые два пункта методики: выбор меры нестационарности сигналов и разработка алгоритма вычисления этой меры.

Меры нестационарности и широкополосности. Для оценки нестационарности сигналов изображений представляется целесообразным воспользоваться методологией статистической радиотехники, в которой используются понятия стационарности в широком и узком смысле, т. е. различают процессы с постоянной /переменной дисперсией и с постоянной/переменной автокорреляционной функцией. Это подсказывает, что обобщенная мера нестационарности должна учитывать совокупное изменение различных статистик S_i сигнала изображения. Это могут быть математические

ожидания, дисперсии, интервалы (или коэффициенты) корреляции яркости и цвета и др. Каждая из статистик вычисляется для некоторых интервалов: это могут быть оцененные по отдельным адаптивным алгоритмам интервалы стационарности или априори компромиссно выбранные интервалы. Они должны быть не слишком малыми для получения приемлемых методических ошибок вычисления статистик и не слишком большими для уменьшения вероятности изменения статистик внутри интервала. Можно считать, что именно такие же соображения лежали в основе выбора окна 8×8 элементов при разработке ранних стандартов *MPEG*.

Общая мера нестационарности M должна вычисляться как сумма (в общем случае взвешенная) мер нестационарности отдельных статистик:

$$M = \sum_{i=1}^K M_i .$$

Для оценки меры нестационарности каждой статистики сигнала можно использовать нормированную статистику, вычисляемую аналогично среднеквадратической полосе частот [111], с тем лишь различием, что в формулу должны входить не сами сигналы, а их статистики S_i , вычисляемые отдельно по каждому аргументу. Ниже для упрощения записан один обобщённый дискретный аргумент $i = [1, N]$. Формула для непрерывных функций непрерывного аргумента включает отношение интегралов от квадрата производной сигнала к интегралу от квадрата самого сигнала [111]. Для дискретных значений аргумента статистик используется не производная, а первая конечная разность [110]:

$$M_i = \frac{\sum_{m=1}^{N-1} (S_{i(m+1)} - S_{im})^2}{\sum_{m=1}^N S_{im}^2} .$$

Предложенная мера нестационарности применима к сигналам с разнообразными статистиками. Например, можно вычислить меру нестационарности винеровского процесса (интеграл от белого шума), имеющего нарастающую со временем дисперсию. Алгоритмы вычисления меры нестационарности можно разбить на два класса, соответствующих детерминированному и адаптивному выбору интервалов усреднения статистик. Адаптивные алгоритмы (например, входящие в состав *Photoshop*) дают оценки меры нестационарности M с точностью, близкой к потенциальной и

требуют очень больших вычислительных затрат (как при кодировании, так и при декодировании). Детерминированные алгоритмы оценки статистик многомерных сигналов хотя и обеспечивают несколько большую погрешность оценки меры нестационарности M , но на порядки проще адаптивных, благодаря оценке зон стационарности с точностью до прямоугольных областей для двумерных сигналов или параллелепипедных областей для трёхмерных сигналов с пропорциональными сторонами. С точки зрения экономии вычислительных затрат перспективными являются размеры таких областей, выражаемые целыми положительными степенями числа 2. Ниже для вычисления меры нестационарности рассматривается совокупность статистических характеристик (среднее значение m_i , дисперсия D_i и коэффициент корреляции r_i) исходного изображения, вычисляемые в пределах окна 8×8 :

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (m_{i+1} - m_i)^2}{\sum_{i=1}^N m_i^2} + \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (D_{i+1} - D_i)^2}{\sum_{i=1}^N D_i^2} + \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (r_{i+1} - r_i)^2}{\sum_{i=1}^N r_i^2}.$$

Важной характеристикой эффективности кодирования изображений является скорость передачи информации. Она определяется энтропией сообщения, но в первом приближении её можно связать с полосой частот, занимаемой сигналом. Поэтому характеризовать изображение полезно и коэффициентом нестационарности, и полосой частот. В качестве меры широкополосности нестационарного сигнала в статистической радиотехнике широко используется среднеквадратическая полоса частот [111]:

$$W^2 = \frac{\left[\sum_{k=1}^{N/2} k^2 |\bar{X}_k|^2 \right]}{\left[\sum_{k=1}^{N/2} |\bar{X}_k|^2 \right]},$$

где $|\bar{X}_k|$ — среднее значение спектральной составляющей.

В ходе поиска компактной представительной выборки в [110] исследовалось большое количество изображений, характерных для систем космического телевидения (269 кадров размером 256×256) и оценивались параметры M и W . Распределение исследованных изображений на плоскости «широкополосность–нестационарность» показано на рис. 2.1.6

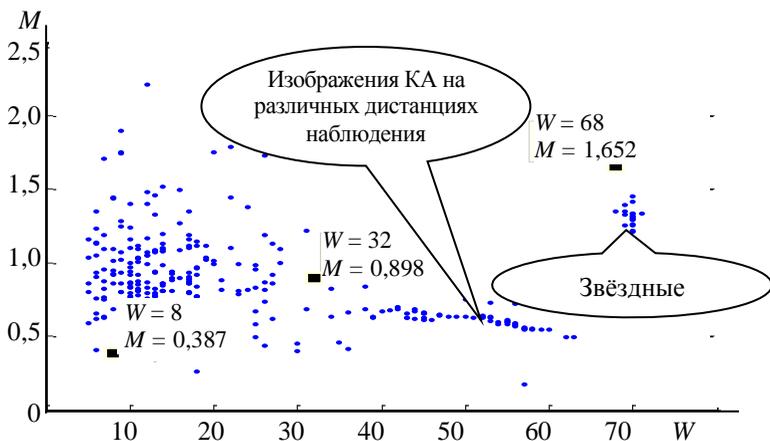


Рис. 2.1.6. Значения мер широкополосности W и нестационарности M по полю для избыточной выборки сюжетов

После ранжирования всех изображений по нестационарности и широкополосности можно сформировать *компактную представительную выборку сюжетов*. Такой подход позволяет разделить все изображения на изображения с малым, средним и большим значениями мер нестационарности и широкополосности и сформировать компактную выборку, представительную, например, для пилотируемой космонавтики (рис. 2.1.7).

Введённая мера нестационарности может быть использована при формировании блоков из различных кадров видеопотока для последующего адаптивного кодирования, например, с помощью трёхмерного дискретного косинусного преобразования (ДКП). Для формирования локальных областей вычисления меры нестационарности может быть использована методология, основанная на пирамидально-рекурсивном методе кодирования [35].

Методики оценивания коэффициента нестационарности по времени M_t могут быть разными. Среди них отметим следующую:

- выбирается некоторое фиксированное количество кадров из видеопотока;
- выбранные кадры делятся на видеопараллелепипеды;
- для каждого видеопараллелепипеда вычисляется коэффициент нестационарности;
- коэффициент нестационарности для видеопотока вычисляется путём усреднения коэффициентов нестационарностей, полученных для видеопараллелепипеда.



$W = 8, M = 1,445$

$W = 16, M = 1,494$

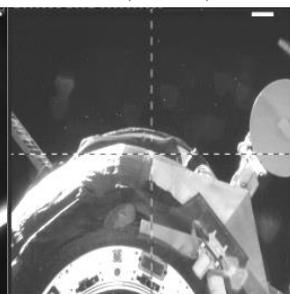
$W = 68, M = 1,65$



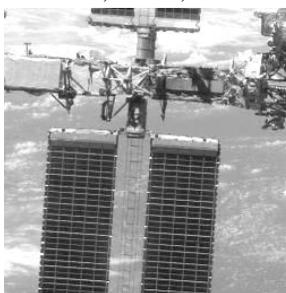
$W = 6, M = 1,135$



$W = 14, M = 1,198$



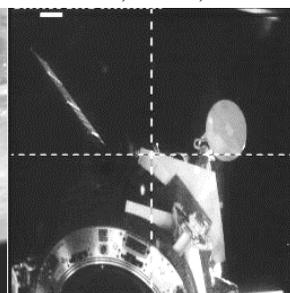
$W = 27, M = 1,131$



$W = 6, M = 0,615$



$W = 19, M = 0,590$



$W = 31, M = 0,684$

Рис. 2.1.7. Компактная представительная выборка статических изображений

Для формирования компактной представительной выборки сюжетов были вычислены коэффициенты нестационарности и широкополосности по времени для различных сюжетов (рис. 2.1.8).

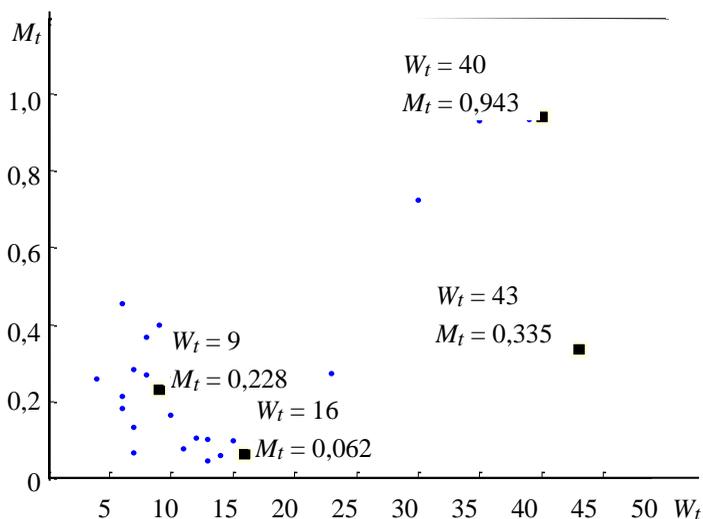


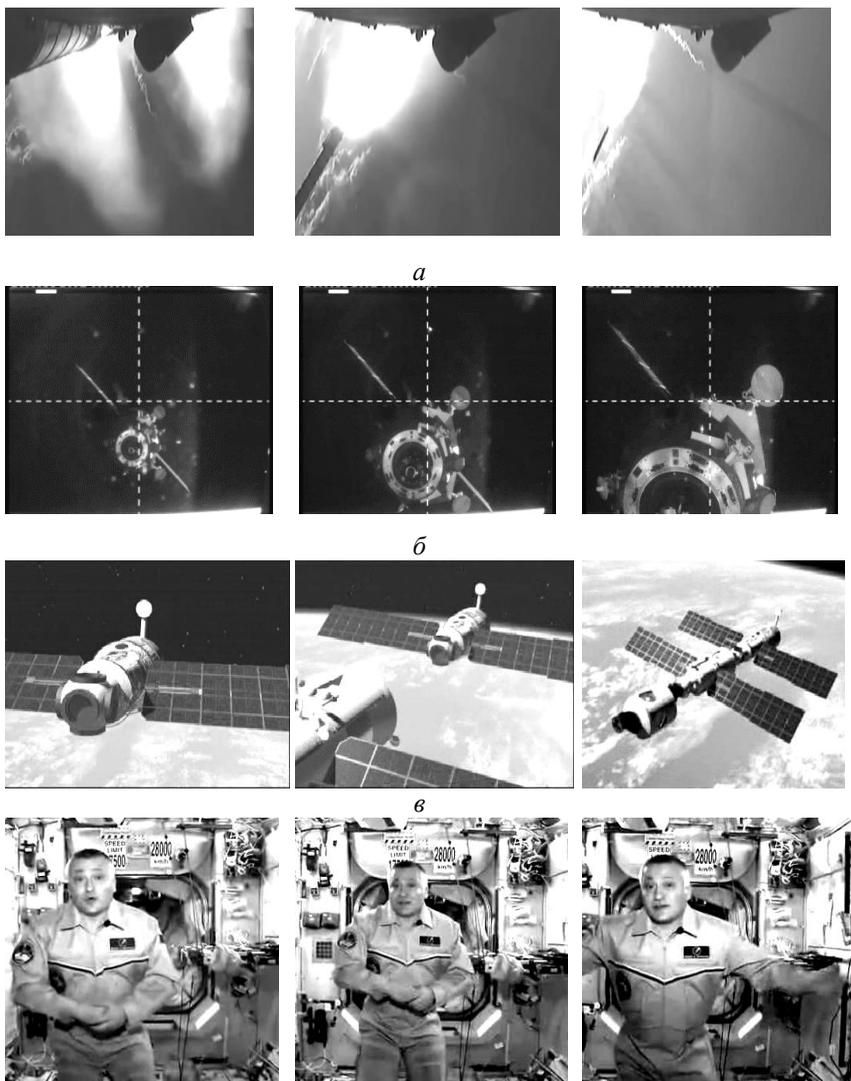
Рис. 2.1.8. Значения мер широкополосности W_t и нестационарности M_t по времени для избыточной выборки видеосюжетов

На основе этих видеопоследовательностей была сформирована компактная представительная для космонавтики выборка из 4 видеосюжетов. На рис. 2.1.9 показаны кадры 1, 125, 250 с указанием мер широкополосности и нестационарности по времени, взятые из этой компактной выборки видеосюжетов.

Оценку статистических характеристик проиллюстрируем на примере анализа группы видеопоследовательностей, относящейся к компактной представительной выборке сюжетов (изображения КА в полёте, космонавтов, МКС и отделения ступеней ракеты-носителя) [76], [112], [113].

Анализ отдельных кадров (рис. 2.1.9б) подтвердил известный результат: для АКФ по горизонтали и по вертикали (рис. 2.1.10) наиболее предпочтителен выбор аппроксимации (функции регрессии) вида $\exp(-|x|)$ [108], [109] не только из традиционного набора аналитических функций (напр., [114]), но и из функций, являющихся преобразованием Фурье от наиболее часто используемых моделей спектров случайных сигналов, аппроксимируемых полиномами Баттерворта различных порядков [115].

Корреляционный анализ видеопоследовательностей может быть проиллюстрирован на примере двух типов сюжетов с различным значением меры нестационарности сигналов [112].



а

б

г

Кадр 1

Кадр 125

Кадр 250

Рис. 2.1.9. Кадры из видеопоследовательностей компактной представительной выборки видеосюжетов:

а – отстыковка ступеней ракеты-носителя, $W_t = 9$, $M_t = 0,228$;

б – стыковка КА на фоне космоса, $W_t = 40$, $M_t = 0,943$;

в – стыковка КА на фоне Земли, $W_t = 43$, $M_t = 0,335$;

г – видеорепортаж с МКС ведёт Ф. Н. Юрчихин, $W_t = 16$, $M_t = 0,062$

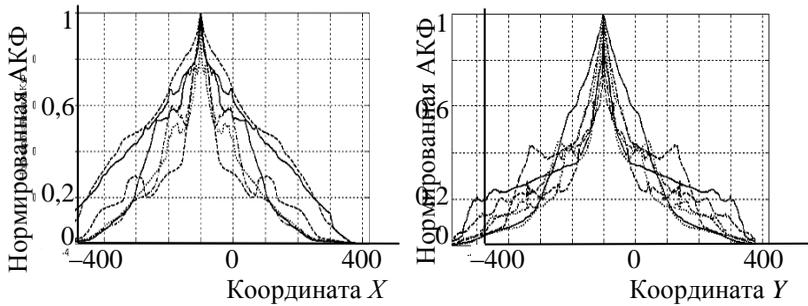


Рис. 2.1.10. Семейство пространственных корреляционных функций

В первом сюжете (рис. 2.1.9 б) происходит постепенное изменение расстояния между МКС и космическим кораблём.

При этом движение происходит по пространственным координатам x , y , а также в процессе движения изменяется масштаб объекта. При практически постоянной скорости КА относительно МКС наблюдаемая скорость перемещения КА для различных фрагментов видеопоследовательности различна, что означает нестационарность случайного поля по времени. Она проявляется в асимметрии временной АКФ (рис. 2.1.11).

При выделении из видеопотока 500 кадров (сформированных с кадровой частотой 25 Гц) и разделении его на десять групп по 10 кадров АКФ характеризуется существенным изменением масштаба и видимой скорости изображения КА, и как следствие, заметным изменением интервала корреляции сигнала по времени.

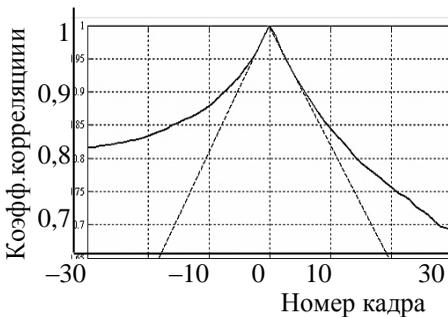


Рис. 2.1.11. Временная АКФ сюжета рис. 2.1.9б; пунктиром показана линейная аппроксимация АКФ, оптимальная для малых абсолютных значений аргумента

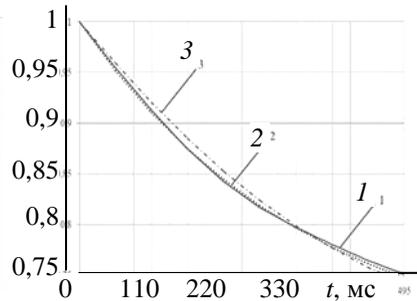


Рис. 2.1.12. Измеренная АКФ по времени сюжета рис. 2.1.9б 1, её аппроксимация для марковского процесса 1-го порядка 2 (СКО 0,019), аппроксимация для марковского процесса 2-го порядка 3 (СКО 0,060)

Анализ временной АКФ показывает, что, аналогично корреляционной функции изображения в отдельном кадре, наиболее предпочтителен выбор функции регрессии вида $\exp(-|x|)$ (рис. 2.1.11, параметры аппроксимирующей функции выбираются по минимуму среднеквадратического отклонения (СКО)).

Во втором сюжете наблюдается отделение отработанной ступени ракеты-носителя при запуске КА на орбиту (рис. 2.1.9а); в ней выделены 300 кадров (с кадровой частотой 25 Гц) и разделены на десять групп по 9 кадров. Эта видеопоследовательность, так же, как сюжет рис. 2.1.9б, характеризуется нестационарностью (большей в силу изменения не только координат и масштаба отделяемой ступени ракеты-носителя, но и его яркости), в силу чего АКФ также несимметрична (рис. 2.1.13).

Так же, как и в первом сюжете, различные группы кадров характеризуются различными значениями интервала корреляции. Анализ временной АКФ сюжета рис. 2.1.9а показывает, что так же, как и временная АКФ сюжета рис. 2.1.9б, она вполне корректно может моделироваться экспоненциальной функцией (рис. 2.1.14). Таким образом, анализ видеопоследовательностей, относящихся к проблематике космического телевидения, показал их нестационарность, а также, что адекватная аппроксимация АКФ возможна с помощью экспоненциальных функций, которые вполне корректно могут использоваться в ходе статистического синтеза адаптивных ТВ камер и цифровых кодеров.

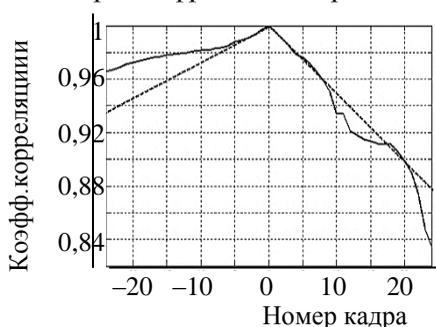


Рис. 2.1.13. Временная АКФ сюжета рис. 2.1.9а; пунктир — линейная аппроксимация АКФ, оптимальная для малых абсолютных значений аргумента

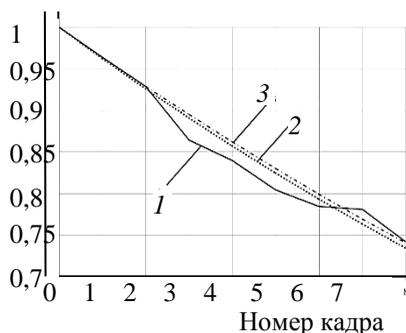


Рис. 2.1.14. Измеренная АКФ по времени сюжета рис. 2.1.9а — 1; её аппроксимация для марковского процесса 1-го порядка — 2 (СКО 0,103); аппроксимация для марковского процесса 2-го порядка — 3 (СКО 0,107)

В общем случае нестационарность сигналов проявляется в том, что во времени изменяются все статистики сигналов изображения, по всем аргументам – пространственным x, y , времени t и длине волны λ . Например, спектральная характеристика облучённости поверхности Земли Солнцем зависит от углов Солнце–нормаль к поверхности наблюдаемого участка Земли и КА–наблюдатель–нормаль к поверхности наблюдаемого участка Земли. Вместе с тем в первом приближении спектральные характеристики облучённости (рис. 2.1.15) или отражения (рис. 2.1.16) принимаются постоянными во времени.

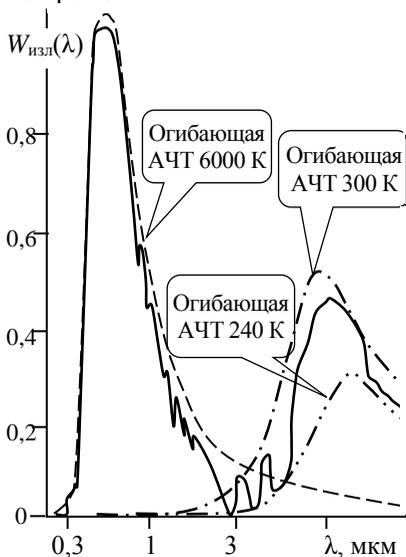


Рис. 2.1.15. Спектральная характеристика электромагнитного излучения Земли в космос, пропускаемого атмосферой

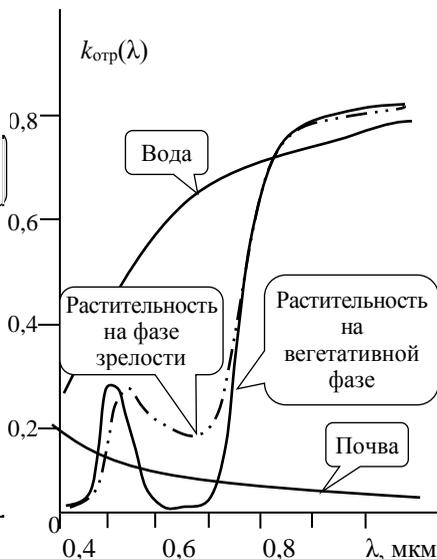


Рис. 2.1.16. Примеры спектральных характеристик отражения для различных поверхностей

При наблюдении самосветящихся объектов используют как спектры целей и фонов [116], [37] (рис. 2.1.17), так и их преобразования в колор-индексы с помощью набора спектральных фильтров [117], [118] (рис. 2.1.18). Поглощение атмосферой (пары воды) излучения Земли в космос на длинах волн $2,7 \dots 2,9$ мкм меньше, чем на длинах волн $4,2 \dots 4,4$ мкм (поглощение CO_2). Однако интенсивность излучения (мешающий фон, на котором обнаруживаются самосветящиеся объекты) в полосе поглощения CO_2 выше в силу большего собственного излучения верхних слоёв атмосферы. Самый глубокий минимум излучения на длинах волн $2,7 \dots 2,9$ мкм связан

с тем, что на более коротких длинах волн преобладает отражённое от Солнца излучение, а на более длинных – собственное излучение Земли и её атмосферы.

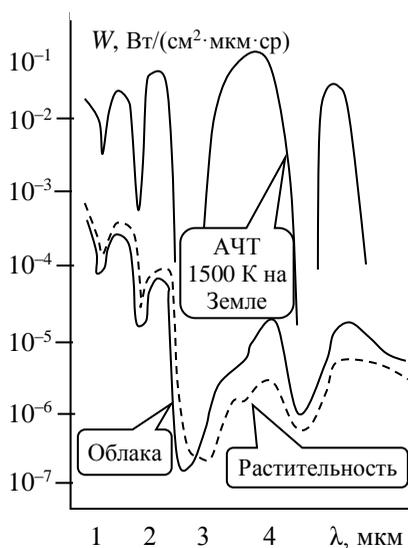


Рис. 2.1.17. Типичная спектральная интенсивность излучения W в космос АЧТ на уровне Земли с $T = 1500\text{ К}$ и фонов

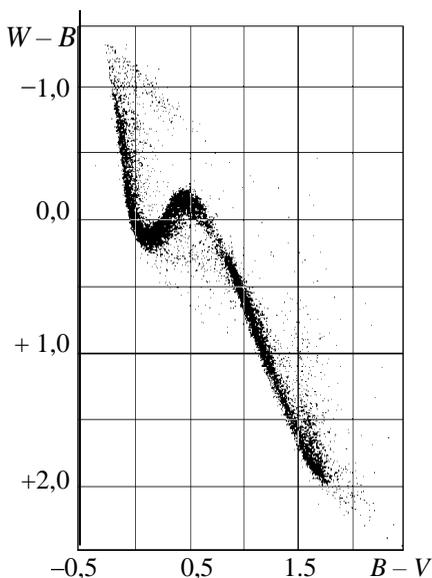


Рис. 2.1.18. Распределение колор-индексов звёзд Каталога

Каталог [117] фотоэлектрических величин (видимой звёздной величины V и колор-индексов $W-B$, $B-V$, $V-R$) содержит 13586 объектов (звёзд и кратных систем) северного неба в четырёхцветной фотометрической системе $WBVR$. В основу метода учёта колор-индексов источников излучения искусственного и естественного происхождения, позволяющего выделить искусственный объект на фоне естественных, положен принцип спектральной (оптической) фильтрации, заключающийся в получении сигнала в различных участках (поддиапазонах) спектра излучения объекта (обнаруживаемого объекта или звезды) в системе $WBVR$, где поддиапазоны спектра имеют значения: $W = 0,3...0,395\text{ мкм}$, $B = 0,365...0,540\text{ мкм}$, $V = 0,465...0,715\text{ мкм}$ и $R = 0,634...0,900\text{ мкм}$.

Сравнение распределений рассчитанных колор-индексов для космических объектов и известных колор-индексов звёзд в прямоугольной координатной плоскости с осями абсцисс $B-V$ и ординат

W–B составляет суть метода обнаружения точечных источников излучения искусственного происхождения [118] (см. раздел 2.2)

В широком классе задач, стоящих перед космическим телевидением, диапазоны изменения статистик сигналов точно не известны и изменяются в ходе наблюдения, в связи с чем ряд параметров телевизионных систем (в первую очередь – звена согласования оптической подсистемы и фотоприёмника) в ходе эксплуатации согласуются с этими статистиками либо автоматически (адаптивно), либо по командам с наземного пункта управления полётами. При этом адаптация к изменению освещённости сюжета (автоматическая регулировка диафрагмы объектива, автоматическое сокращение чёткости при недостатке освещённости и автоматическая регулировка времени накопления при фиксированной кадровой частоте) освоена телевидением давно, а адаптация параметров разложения к динамике сюжета является новым словом к телевизионной технике. При этом адаптация параметров разложения подразделяется на два класса: перестройка одного из параметров при фиксированных других параметрах (напр, адаптация кадровой частоты при фиксированной чёткости; см. раздел 2.2) или адаптация совокупности параметров с их взаимообменом (напр., взаимообмен чёткости и кадровой частоты, см. раздел 2.4).

2.2. Совместное различение сигналов и оценивание их параметров

Обнаружение объектов на сложном фоне (различение сигналов объектов и фонов) входит в функции различных систем космического телевидения, ведущих наблюдение как на фоне Земли, так и на фоне космоса [5]–[8], [11], [15], [26], [29], [38]. Наличие сложного фона определяет методологию обработки сигналов как сжатие информации в широком смысле. Ключевым шагом в таком сжатии информации является совместное различение сигналов объектов и оценивание их параметров. Проблема обнаружения объектов имеет огромное количество решений; впервые она была поставлена и решалась в радиолокации и приобрела специфику, отразившуюся в понятии «селекции движущихся целей». Для пассивных систем, в которых не может быть использован эффект Доплера, селекция подвижных объектов основана на межкадровой обработке изображений, традиционно разделяемой на подсистемы подавления («выбеливания») фона и вторичного траекторного накопления информации [115], [130]. Первая задача подавления фона при гауссовской модели наблюдаемых случайных полей в наиболее полной постановке [131] позволила найти оптимальное

(достаточно сложное) решение для подавления сложного фона, включающего подвижную и неподвижную компоненты [34]. Для многих моделей обнаружения сигналов перспективным стало приложение задачи о разладке [132], которая естественным образом трактовалась как появление обнаруживаемого объекта и позволяла построить эффективные (достаточно сложные) алгоритмы [133] межкадрового накопления информации об обнаруживаемых объектах. Такое накопление может реализовываться с помощью нейронных сетей, более простых по объёму памяти, чем требуется для корреляционного метода различения сигналов (напр., для идентификации наблюдаемого участка звёздного неба при астроориентации). Обилие различных моделей сигналов и фонов, а также стремление синтеза квазиоптимальных, но относительно простых алгоритмов, привели к синтезу большого количества методов и алгоритмов, большинство из которых опиралось на концепцию совместного различения и оценивания параметров сигналов [134]. Практически реализованные методы (напр., [120]–[126]), в том числе включающие селекцию подвижных объектов с использованием признака скоростного смаза изображения (напр., [120]–[123], [126]), достаточно эффективно позволяют обнаруживать подвижные объекты на сложном фоне.

Основные параметры системы являются результатом совместного синтеза фотоприёмника с кадровым накоплением и программно-аппаратного комплекса. Ниже для компактности рассмотрен частный случай этой задачи – обнаружение объектов на звёздном фоне – древнейшая задача астрономии, современный этап развития которой связан с кометно-метеоритной опасностью и наблюдением искусственных спутников Земли [120]–[129]. В решение этих задач погружено большое количество наземных средств, и планируется увеличение количества наблюдательных инструментов. Для таких инструментов важны не только проникающая способность телескопов, но и оптимизация электронной аппаратуры, включающей фотоприёмную подсистему и программно-аппаратные средства обработки изображений, ответственные за высокую надёжность обнаружения подвижных объектов на звёздном фоне.

При рассмотрении системы совместного различения сигналов объектов и оценивания их параметров опорная триада синтеза традиционно включает: критерий качества, априорную информацию и ограничения на реализацию фотоприёмника и вычислителя, реализующего оптимальный алгоритм (в силу этих ограничений становящийся квазиоптимальным).

Априорная информация связана с параметрами оптической системы, включающими *спектральные и динамические* свойства изображений объектов и фонов и их изменения в силу относительного движения наблюдателя, фона и объекта. Поля зрения телескопов, даже считающиеся весьма большими, не превышают нескольких градусов. Это в силу движения носителя (в частности, при наземных наблюдениях, в силу вращения Земли) позволяет считать наблюдаемый в конкретный момент времени участок звёздного неба смещающимся линейно, как правило с медленно изменяющимся вектором скорости. Здесь (на первом этапе синтеза) в силу медленности изменения положения визирной оси системы по сравнению с обрабатываемой одновременно группой кадров пренебрежём ошибками стабилизации визирной оси [125]. Движение визирной оси приводит к тому, что почти все наблюдаемые объекты (обнаруживаемые и фоновые) появляются в поле зрения системы, входя в него снаружи. Это означает, что известные методы решения задачи о разладке применить трудно. Исключение составляет вырожденный случай совместного движения наблюдателя и обнаруживаемого объекта, например, наблюдение геостационарных спутников с Земли, которые выглядят как неподвижные на фоне подвижных звёзд (рис. 2.2.1) [120]–[123], на котором вектора смаза изображений геостационарных спутников близки к нулю, для части звёзд на краю поля зрения они измеряются с аномальной ошибкой, для пороговых сигналов звёзд сигнал распадается на несколько отдельных связанных областей. Другой вырожденный случай наблюдается при весьма малых временах кадра системы обнаружения, когда вектора скорости фонового звёздного поля вырождаются, и фон наблюдается как неподвижный (рис. 2.2.2). Важной составляющей априорной информации является то, что полезный объект один (их мало), а фоновых звёзд по сравнению с числом объектов много, но звёзд в силу ограничений поля зрения и чувствительности достаточно мало, в результате чего можно считать, что прямоугольники, в которые вписаны треки звёзд и объекта, не пересекаются. Например, для чувствительности 6^m и 100 кв. градусов можно положить $n_f \approx 100$, что при фотоприёмнике с числом пикселей 10^6 соответствует средней площади на звезду 10^4 пикселей [135]. Согласование оптической и фотоприёмной подсистем традиционно приводит к тому, что для достижения максимальной точности измерения координат звёзд функция рассеяния точки объектива соответствует участку фотоприёмной матрицы размером 3×3 пиксела [33]–[37].

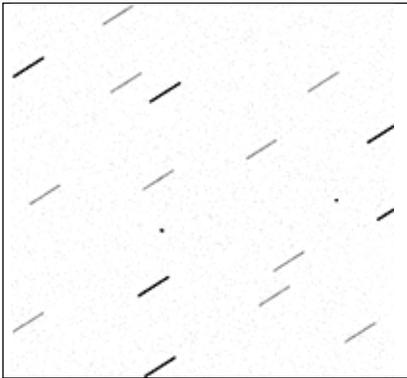


Рис. 2.2.1. Подвижное поле звёзд и неподвижные объекты (негатив)

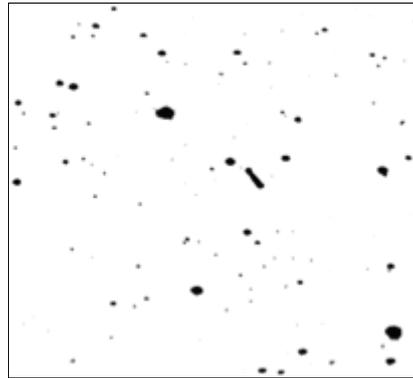


Рис. 2.2.2. Неподвижное поле звёзд и подвижный объект (негатив)

Значение скоростного смаза \vec{v} выражается в числе пикселей с линейным размером Δ и определяется вектором скорости изображения объекта на фотоприёмнике \vec{V} и временем кадра T_k : $\vec{v} = \vec{V}T_k / \Delta$. Распадение смазанного изображения спутника на части в такой модели возможно при малом отношении сигнал/шум и вследствие его вращения [120]–[123]. Все промежуточные случаи характеризуются наличием скоростного смаза как изображений звёзд, так и обнаруживаемых объектов, причём признаком классификации объектов на звёздном фоне в присутствии шумов (аппаратурных и фотонных) служит различие в их векторах скоростного смаза.

Ограничения. Ограничение сложности ведёт к разделению (декомпозиции) обработки на несколько этапов, включающих согласование размера пиксела с ФРТ объектива, квантование амплитуды накопленного в пикселах сигнала, сравнение с первичным порогом для принятия решения о наличии «подозрительных» объектов (первичное обнаружение), СДЦ (например, методом «завязки траекторий», методом кластеризации, использованием нейронных сетей).

Критерий. В реальных условиях малой априорной информации о параметрах сигналов при совместном различении сигналов объекта и фона и оценивании их параметров используется *метод максимального правдоподобия* (а не байесовский метод или метод максимума апостериорной вероятности) [134]. При его использовании принадлежность сигнала к одной гипотезе из принятой

совокупности гипотез «рассматривается как параметр с неизвестным значением; вероятностная модель этого параметра теперь не нужна. Даже когда известно, что это случайный вектор, эта информация не используется» [134]. Это означает, что при проверке гипотез о наличии или отсутствии сигнала обнаруживаемого объекта сформированная функция правдоподобия сравнивается с порогом, а при оценивании координат объектов находится аргумент максимума этой функции.

Обработка видеоинформации на основе априорной информации о динамических свойствах объектов и фонов производится по нескольким кадрам; обычно в силу ряда ограничений сводится к последовательно осуществляемым *первичной* и *вторичной* обработке фотометрической информации. В процессе *первичной* обработки решаются две задачи, первая из которых – принятие решения об обнаружении (справедливости гипотезы H_1) или необнаружении (справедливости гипотезы H_0) объектов (*вне зависимости от их принадлежности к фону или селективируемым объектам*), вторая – формирование текущих координат $x(n)$, $y(n)$ обнаруженных объектов.

Вторичная обработка сводится к обнаружению траекторий объектов, различению объектов по типу траектории и оцениванию параметров этих траекторий в процессе сопровождения объектов. В космических телевизионных системах, в отличие от радиолокационных, этот этап осуществляется с учётом эффекта смаза изображения как селективируемых объектов, так и фона.

Модель наблюдения входного сигнала при *первичной* обработке включает непрерывный сигнал $u_{ij}(t)$ на выходе пиксела с координатами i, j для гипотез H_0 (сигнала от объекта нет) и H_1 (сигнал от объекта есть) и представляется в виде аддитивной смеси:

$$\begin{aligned} \text{при } H_0 \quad u_{ij}(t) &= g_{ij}(t) + f_{ij}(t); \\ \text{при } H_1 \quad u_{ij}(t) &= S_{ij}(t, \mathbf{z}(t)) + g_{ij}(t) + f_{ij}(t), \end{aligned} \quad (2.2.1)$$

где: $\mathbf{z}(t) = (x \ y)^T \subset \Omega$ – вектор искомых параметров, в частности координат объекта x и y в картинной плоскости, принадлежащий пространству Ω ; $S_{ij}(t, \mathbf{z}(t))$ – полезный сигнал; $g_{ij}(t)$ – сигнал фона; $f_{ij}(t)$ – фотонный шум (помеха).

Если производится обнаружение малоразмерных объектов на звёздном фоне, можно считать, что плотность вероятностей сигналов $S_{ij}(t, \mathbf{z}(t))$ и сигналов $f_{ij}(t)$, определяется импульсной характеристикой (функцией рассеивания точки) объектива, которую часто

аппроксимируют гауссовской кривой. Используя теорему свёртки можно определить плотности вероятностей $\omega(u_{ij}, \mathbf{z})$ сигналов $u_{ij}(t)$, а также плотность вероятности $\omega(\mathbf{u}, \mathbf{z})$ векторного сигнала $\mathbf{u}(t)$ по совокупности пикселей. Сигнал $\mathbf{u}(t)$ принадлежит пространству значений $U (\mathbf{u}(t) \subset U)$.

Для получения оценок координат объектов $\hat{\mathbf{z}}(t)$ (имеющих две составляющие – целочисленную по координате в пикселях и субпиксельную, вычисляемую по центру тяжести), т. е. параметров вектора $\mathbf{z}(t)$, принимается решающая функция (сравнение с порогом) $\gamma(\mathbf{u})$, минимизирующая при заданной функции штрафов $c(\mathbf{z}, \gamma)$ средний риск R_δ оценивания координат обнаруживаемых объектов (в задачах этого класса традиционно, начиная с работ Ф. М. Вудворда, используется квадратичная функция потерь)

$$R_\delta = \int \int_{U \Omega} c(z, \gamma(\mathbf{u})) \omega(\mathbf{u}, \mathbf{z}) d\mathbf{u} dz = \int \int_{U \Omega} c(z, \gamma(\mathbf{u})) \omega(\mathbf{u} | \mathbf{z}) \omega(\mathbf{z}) d\mathbf{u} dz, \quad (2.2.2)$$

где: $\omega(\mathbf{u} | \mathbf{z})$ – функция правдоподобия параметров \mathbf{z} ; $\omega(\mathbf{z})$ – априорная плотность вероятности \mathbf{z} .

Общая идея решения задачи обнаружения при модели (2.2.1) и критерии (2.2.2) опирается на каноническую схему оценщика-вычитателя [115], которая использует операцию формирования оценки фона $\hat{s}_\Phi(x, y, t)$, вычитания этой оценки, накопления энергии сигнала (в контексте рассматриваемой частной задачи – траекторного накопления) и сравнения результата с порогом γ , выбираемым исходя из заданной вероятности ложной тревоги (последняя выбирается с учётом ограничения производительности бортового вычислителя):

$$\begin{matrix} H_1 \\ \iiint \{u_{ij}(t) - \hat{g}_{ij}(t)\} dx dy dt > \gamma \\ H_0 \end{matrix} \quad (2.2.3)$$

На практике доступны редуцированные сигналы – оцифрованные сигналы с выходов АЦП фотоприёмников. При условии «непрозрачности» объекта и фона, а также аддитивности шумов измерений, модель состояний яркости изображений (2.2.1) можно преобразовать к виду [136]:

$$\tilde{\mathbf{L}}(n) = \mathbf{R}(n)\mathbf{H}(n) + \mathbf{G}(n) + \mathbf{F}(n), \quad (2.2.4)$$

здесь для каждого пиксела с координатами (i, j) : $\tilde{\mathbf{L}}(n)$ – вектор наблюдаемого изображения $\{l(i, j, n) \in L_n\}$; $\mathbf{H}(n)$ – вектор изображения объекта $\{h(i, j, n) \in H_n\}$; $\mathbf{G}(n)$ – вектор изображения фона $\{g(i, j, n) \in G_n\}$; $\mathbf{F}(n)$ – вектор шума; $\mathbf{R}(n)$ – квадратная диагональная матрица $\{r(i, j, n) \in R_n\}$, такая, что $r(i, j, n) = 1$, если пиксел принадлежит объекту, либо $r(i, j, n) = 0$ в противном случае.

При доминировании фотонного шума фона, распределённого по закону Пуассона со средним значением $m_{gijn} \gg 1$, модель состояний яркости изображений фона $g(i, j, n)$ и объекта $h(i, j, n)$ можно представить в виде:

$$g(i, j, n) \sim N(m_{g(ijn)}, D_{g(ijn)} = m_{g(ijn)}); h(i, j, n) \sim N(m_{h(ijn)}, D_{h(ijn)}),$$

где: $N(m_x, D_x)$ – обозначение нормального распределения с математическим ожиданием m_x и дисперсией D_x .

В силу аддитивности сигналов фона и объекта флуктуации имеют дисперсию $D_{g(ijn)} + D_h$, при малых контрастах определяются фоном $D_{g(ijn)} = m_{g(ijn)}$, а при больших контрастах – объектом.

Пусть по результатам обработки видеoinформации предыдущих кадров сформирована оценка фоновой составляющей редуцированного сигнала $\hat{\mathbf{G}}(n)$. Тогда, в результате пространственной и временной дискретизации сигнала $\mathbf{u}(t)$ с выхода АЦП фотосенсора и компенсации фоновой составляющей будет сформирована дискретная последовательность $\mathbf{L}(n) = \tilde{\mathbf{L}}(n) - \hat{\mathbf{G}}(n)$, т. е. происходит редукция выборочного пространства $U \Rightarrow \tilde{U}$. Следовательно, происходит переход к дискретному многомерному распределению $\tilde{\omega}(\mathbf{L}, \mathbf{z})$, описываемому на практике дискретной цепью Маркова с r состояниями (количеством значений яркости в выходном сигнале $\mathbf{L}(n)$) и связностью v (определяющей гладкость функции $\mathbf{z}(n)$). Получить аналитическое решение задачи обнаружения для процессов, соответствующих цепям Маркова с большим числом состояний и связностей, затруднительно. Поэтому прибегают к аппроксимации распределения $\tilde{\omega}(\mathbf{L}, \mathbf{z})$ с заданными значениями r и v .

Средний риск оценивания координат обнаруживаемых объектов $\tilde{\delta}$, зависящий от распределения $\tilde{\omega}(\mathbf{L}, \mathbf{z})$, примет вид:

$$\tilde{\mathbf{R}}_{\delta} = \int \int_U c(\mathbf{z}, \gamma(\mathbf{L})) \tilde{\omega}(\mathbf{L}, \mathbf{z}) \omega(\mathbf{z}) d\mathbf{L} d\mathbf{z}. \quad (2.2.5)$$

Учитывая пространственную и временную корреляцию процесса $\mathbf{L}(n)$ по отношению к обнаруживаемому объекту, будем

рассматривать получившие широкое распространение на практике в системах обработки фотометрической информации односвязные однородные (переходные вероятности не зависят от времени n) марковские цепи [137]. Закон распределения вероятностей в такой цепи описывается переходной матрицей

$$P_M = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdot & P_{1r} \\ P_{21} & P_{22} & \cdot & P_{2r} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{r1} & P_{r2} & \cdot & P_{rr} \end{bmatrix},$$

где $p_{\alpha\beta}$ – вероятность перехода рассматриваемой системы из состояния A_α ($\alpha = 1 \dots r$) в состояние A_β ($\beta = 1 \dots r$). При этом для системы обработки фотометрической информации задаются начальные вероятности $p_{0\alpha}$ ($\alpha = 1 \dots r$).

Совместное распределение вероятностей выборочного вектора $\mathbf{L} = (\mathbf{L}(0), \mathbf{L}(1), \mathbf{L}(2), \dots, \mathbf{L}(k-1))^T$ последовательности $\mathbf{L}(i)$ для k кадров, когда каждый из элементов последовательности $\mathbf{L}(i)$, $i = 1, 2, \dots, n-1$ может принимать r значений $\mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2, \dots, \mathbf{L}_r$ при аппроксимации последовательности $\mathbf{L}(i)$ односвязной цепью Маркова имеет вид [138]:

$$\begin{aligned} \omega(\mathbf{L}) &= \tilde{\omega}(\mathbf{L}(0)) \cdot \tilde{\omega}(\mathbf{L}(1) | \mathbf{L}(0)) \cdot \tilde{\omega}(\mathbf{L}(2) | \mathbf{L}(1)) \cdot \dots \cdot \tilde{\omega}(\mathbf{L}(n-1) | \mathbf{L}(n-2)) = \\ &= \prod_{\alpha=1}^r \left[p_{0\alpha}^{d_\alpha} \prod_{n=0}^{k-1} \prod_{\beta=1}^r p_{\alpha\beta}^{d_{\alpha\beta}(n)} \right], \end{aligned} \quad (2.2.6)$$

где: $p_{0\alpha}$ – вероятность начального состояния системы обработки информации; d_α – индикатор начального состояния такой, что $d_\alpha = 1$ при $\mathbf{L}(0) = \mathbf{L}_\alpha$ и $d_\alpha = 0$ при $\mathbf{L}(0) \neq \mathbf{L}_\alpha$ ($\sum_{\alpha=1}^r d_\alpha(0) = 1$); $p_{\alpha\beta}(n)$ – вероятность того, что $\mathbf{L}(n-1) = \mathbf{L}_\alpha$, а $\mathbf{L}(n) = \mathbf{L}_\beta$; $d_{\alpha\beta}(n)$ – индикатор перехода из \mathbf{L}_α в \mathbf{L}_β такой, что $d_{\alpha\beta}(n) = 1$ при $\mathbf{L}(n-1) = \mathbf{L}_\alpha$, $\mathbf{L}(n) = \mathbf{L}_\beta$ и $d_{\alpha\beta}(n) = 0$ при $\mathbf{L}(n-1) = \mathbf{L}_\alpha$ и $\mathbf{L}(n) \neq \mathbf{L}_\beta$.

На основании совместного распределения (2.2.6) может быть записан логарифм функции правдоподобия:

$$\ln K(\mathbf{L} | \mathbf{z}) = \sum_{\alpha=1}^r d_\alpha w_\alpha(0) + \sum_{n=0}^{k-1} \sum_{\alpha, \beta} d_{\alpha\beta}(n) w_{\alpha\beta}(n | \mathbf{z}), \quad (2.2.7)$$

где: $w_\alpha(0) = \ln(p_{0\alpha}(\mathbf{z})/p_{0\alpha\Pi})$, $w_{\alpha\beta}(n) = \ln(p_{\alpha\beta}(n|\mathbf{z})/p_{\alpha\beta\Pi}(n))$, – весовые коэффициенты; $p_{0\alpha}(\mathbf{z})$ и $p_{0\alpha\Pi}$ – вероятности начального состояния системы обработки информации при наличии полезного сигнала и

помехи, соответственно; $p_{\alpha\beta}(n|\mathbf{z})$ и $p_{\alpha\beta\Pi}(n)$ – вероятности перехода системы из состояния A_α ($\alpha = 1 \dots r$) в состояние A_β ($\beta = 1 \dots r$) при наличии полезного сигнала и помехи, соответственно.

В результате решающее правило (2.2.3) в приложении к первичной обработке с учётом (2.2.7) преобразуется к виду:

$$\ln K(\Lambda | \mathbf{z}) \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \gamma, \quad (2.2.8)$$

Вторым этапом первичной обработки сигнальной информации от матричного фотоприёмника является определение текущих значений координат обнаруженных объектов.

Особенностью оптимизации и адаптации твердотельных телевизионных систем обнаружения объектов и оценивания их координат является дискретность раstra. Она приводит, в частности, к тому, что классический согласованный фильтр (фильтр Норта), формализованный для непрерывного аргумента, для случая непрерывного аргумента на входе и дискретного аргумента на выходе уже не применим. Более того, если в непрерывных системах при обнаружении сигналов и оценивании их координат этот фильтр Норта универсален, то в системах с непрерывным входом и дискретным выходом оптимальный размер зоны накопления в задачах обнаружения и оценивания координат различен [33]–[37]. В результате фотоприёмная матрица ТВ камеры согласуется с объективом так, что ФРТ объектива дискретизируется примерно на 9 соседних пикселей (3×3), что обеспечивает минимум ошибок оценивания координат. Такая дискретизация для предшествующей операции – обнаружения объектов – излишне подробна, и формирование функции правдоподобия (2.2.7) и (2.2.8) для обнаружения объектов должно включать либо линейную фильтрацию отсчётов пикселей в соответствии с априорной информацией о ФРТ, либо квазиоптимальную операцию группирования сигналов соседних пикселей (бинирования) [33]–[37].

В зависимости от размеров космического объекта, а также интенсивности сигналов, поступающих на фоточувствительную область фотоприёмника, пороги обнаружения могут быть превышены сигналом от одного космического объекта в нескольких смежных пикселях. В этом случае следует определять координаты объектов, исходя из совместной обработки сигналов таких смежных пикселей. После выполнения операции (2.2.8) сравнения с порогом в каждом кадре определяются координаты элементов с сигналом,

превышающим порог (рис. 2.2.3а). После выделения контуров объекта формируется массив чисел $h(i, j, n)$, описывающий изображение объекта с подчеркнутыми изменениями яркости (рис. 2.2.3 б) [138].

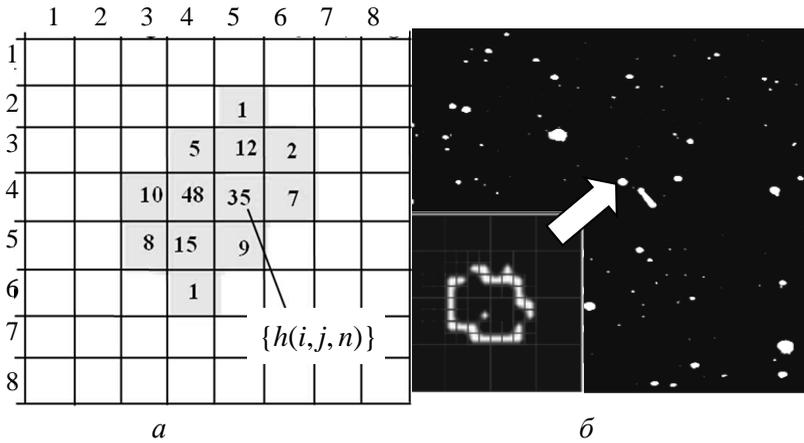


Рис. 2.2.3. Изображение объекта в уровнях яркости его элементов – а; результат выделения одного из объектов (одной из связанных областей) – б

Для достижения минимума среднего риска (2.2.5) координаты объекта оцениваются с субпиксельной точностью по центрам тяжести группы пикселей (связной области, принадлежащей одному объекту) [33]–[37]:

$$x(n) = \frac{\sum_{i=i_{\text{нач}}}^{i_{\text{кон}}} \sum_{j=j_{\text{нач}}}^{j_{\text{кон}}} [h(i, j, n) \cdot i]}{\sum_{i=i_{\text{нач}}}^{i_{\text{кон}}} \sum_{j=j_{\text{нач}}}^{j_{\text{кон}}} h(i, j, n)}, \quad y(n) = \frac{\sum_{i=i_{\text{нач}}}^{i_{\text{кон}}} \sum_{j=j_{\text{нач}}}^{j_{\text{кон}}} [h(i, j, n) \cdot j]}{\sum_{i=i_{\text{нач}}}^{i_{\text{кон}}} \sum_{j=j_{\text{нач}}}^{j_{\text{кон}}} h(i, j, n)},$$

где $i_{\text{нач}}, j_{\text{нач}} (i_{\text{кон}}, j_{\text{кон}})$ координаты границ объекта, $h(i, j, n)$ – коды яркости элементов разрешения в составе объекта. Таким образом, результатом первичной обработки сигнальной информации от матричного фотоприёмника являются текущие значения координат обнаруженных космических объектов. Полученные результаты в виде выделенных групп пикселей многих объектов (селектируемых и фоновых) и оценок их координат передаются на *вторичную обработку*, в задачи которой входит различение селектируемых сигналов и фоновых объектов, например, селекция сигналов искусственных спутников Земли на фоне звёзд [120]–[129]. Различение сигналов объектов проводится с использованием двух свойств селектируемых объектов: отличие от фоновых объектов векторов

смещения центров тяжести и векторов смаза для этих двух классов объектов. Конструктивное использование скоростного смаза малоразмерных объектов для оценки вектора скорости и экстраполяции координат объектов широко используется [120]–[129]; ниже рассмотрим подход к задаче совместного различения и оценивания сигналов аномально движущегося объекта и подвижного звёздного фона с позиций кластерного анализа.

В ряде задач обнаружения объектов с аномальным вектором скорости бывает важным выделить подкласс объектов с нулевой скоростью (к которому заведомо не относится фон, характеризуемый ненулевой скоростью). Решение задачи обнаружения должно быть осуществлено на основе априорной информации (накапливаемой на первом этапе наблюдения, т. е. в ходе «обучения», например, при реализации алгоритма с помощью нейронной сети). В эту формируемую информацию должно войти оцененное значение возможной ошибки ε_i (разброс оценки \hat{v}_i вектора скоростного смаза относительно центра кластера, т. е. соответствующей i -ой моды функции распределения, рис. 2.2.4).

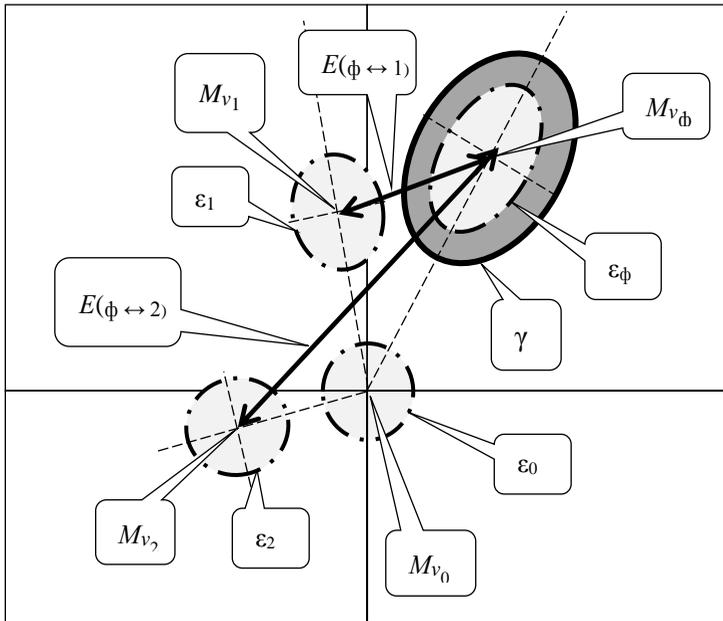


Рис. 2.2.4. К определению порога γ по критерию Неймана–Пирсона о принятии решения о наличии объектов с векторами смаза, отличными от типичного для фона M_{v_Φ} ; ε_i – разброс векторов смаза в рамках i -ого кластера

Важным моментом оптимизации вторичной обработки становится существование *трёх задач*, включающих определение: *алгоритма* формирования статистик сигнала, *порога* принятия решения и *времени кадра*.

Задача обнаружения объектов с аномальным вектором смаза приобретает вид, типичный для задач, решаемых с использованием критерия Неймана–Пирсона, при котором проводится сравнение формируемого функционала правдоподобия с *порогом* γ , выбираемым для обеспечения минимума вероятности $p(H_0|H_1)$ пропуска цели при заданной вероятности $p(H_1|H_0)$ ложной тревоги (рис. 2.2.4):

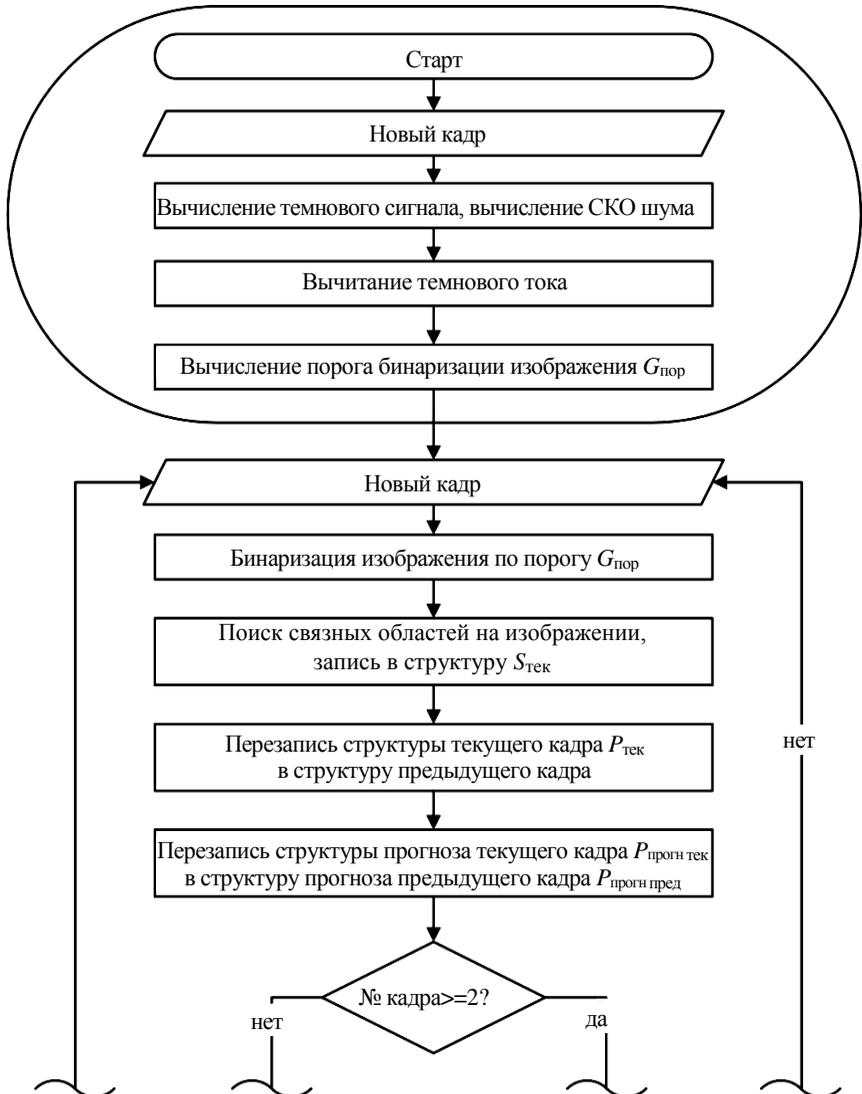
$$\gamma = \operatorname{argmin} R; \quad R = p(H_0|H_1) + p(H_1|H_0). \quad (2.2.9)$$

В качестве примера рассмотрим квазиоптимальный алгоритм внутрикадровой и межкадровой обработки для совместного обнаружения–оценивания формирования методом кластерного анализа, упрощённый благодаря использованию промежуточного обнаружения связанных областей и межкадровой обработки бинарных сигналов (рис. 2.2.5). Промежуточные результаты работы алгоритма представлены на рис. 2.2.6–2.2.7 [135].

Алгоритм даёт задержку на два кадра, связанную с необходимостью составления прогноза движения объектов на изображении. Кластеры объектов (рис. 2.2.7), а именно структура *Cluster* (рис. 2.2.5), появляются на третьем кадре после сравнения реального положения объектов с прогнозом, так как в структуру *Cluster* записываются только те объекты, прогноз которых совпал с реальным положением в третьем кадре. Это необходимо для фильтрации распавшихся треков с низким отношением сигнал/шум, а также остальных нежелательных однокадровых событий. Прогноз положения треков определяется вычислением смещения центра трека между двумя кадрами и угла наклона смещения [135].

Из-за наличия шумов на изображении, форма бинаризованных объектов от кадра к кадру может меняться. Это критично для неподвижных объектов, чья форма определяется ФРТ оптики телевизионной системы. Из-за изменения формы объекта наклон трека может измениться вплоть до 90° . Для уменьшения вероятности ошибки опознавания неподвижных объектов на этапе свёрки прогнозируемого положения объекта с реальным в текущем кадре, вводится проверка на размер объекта [135].

Тестирование алгоритма показало, что при достаточном расстоянии между кластерами даже в условиях потери слитности смаза слабых сигналов совместное применение авторегрессионного метода и межкадровой траекторной обработки при выборе порога (2.20) позволяет достаточно надёжно различать сигналы различных кластеров.



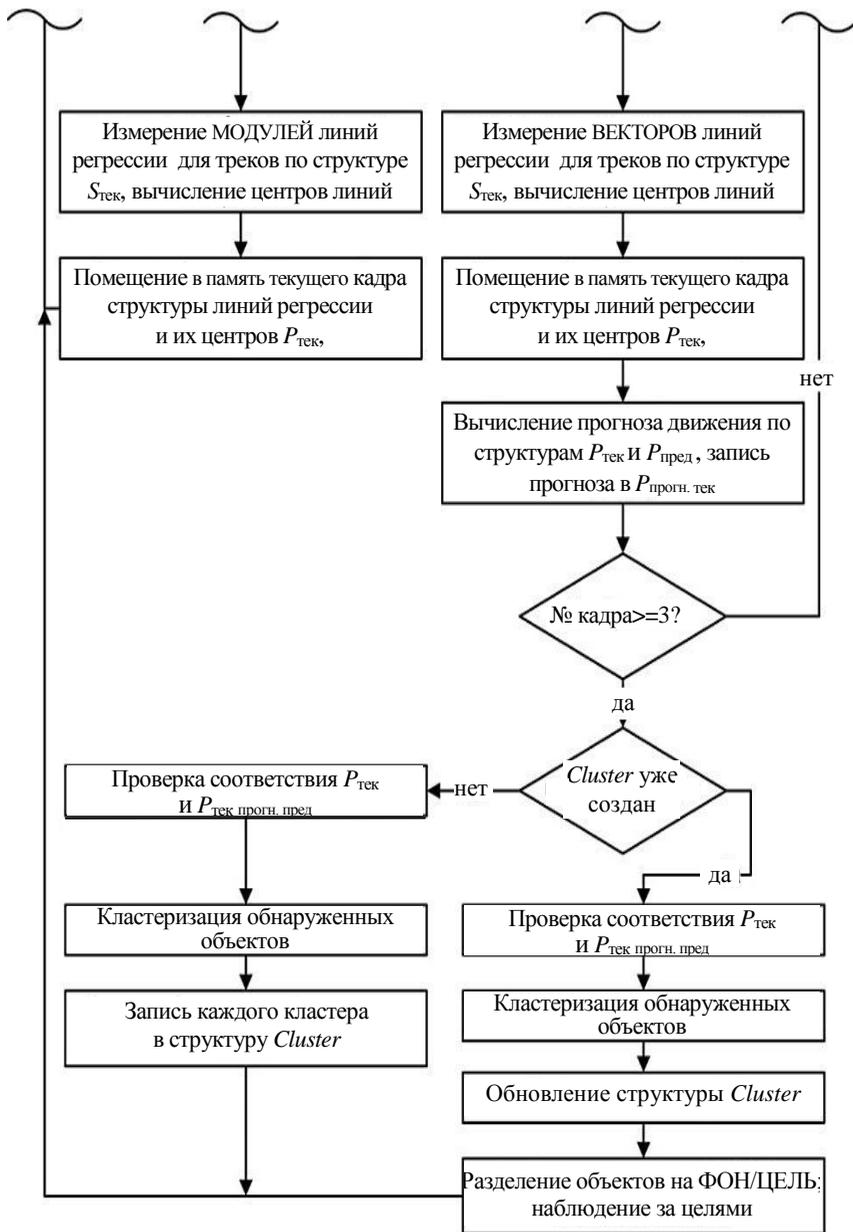


Рис. 2.2.5. Алгоритм совместного обнаружения–оценивания на основе измерения авторегрессии и межкадровой обработки при формировании кластеров



Рис. 2.2.6. Бинарный сигнал (треки слабых сигналов теряют слитность) – *a*; авторегрессионное вычисление векторов смаза и стробы межкадровой обработки – *б* (всё – негатив)

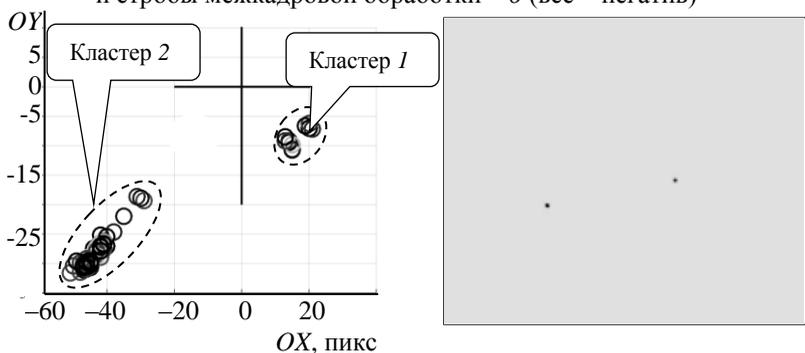


Рис. 2.2.7. Разделение обнаруженных сигналов на кластеры по вектору смаза

Рис. 2.2.8. Результат селекции сигналов кластера 1 (негатив)

Оптимизация *времени кадра* может проводиться для трёх моделей наблюдения: неподвижный объект и подвижный фон (рис. 2.2.1), подвижный объект и неподвижный фон (рис. 2.2.2) и подвижные объекты на подвижном фоне. Разумным критерием оптимальности представляется минимум взвешенной суммы задержки принятия решения τ , пропорциональной времени кадра T_k , и риска R различения сигналов объекта и фона [135]:

$$T_k = \operatorname{argmin}\{c_\tau T_k + c_\varepsilon R\}. \quad (2.2.10)$$

Функционал (2.2.10) означает, что для минимизации задержки τ принятия решения нужно выбрать время кадра T_k самым малым из тех, при которых риск R ошибочного решения о принадлежности объекта к тому или иному классу равен нулю (при нефинитной плотности вероятностей ошибок – близок к нулю). Это достигается обеспечением необходимого и достаточного «энергетического

отношения сигнал/шум» Ψ для расстояний $E_{(\phi \leftrightarrow i)}$ и ошибок ε_i (рис. 2.2.4) с учётом их различных ковариационных матриц для разных кластеров и выбором порога (2.2.9). Для всех трёх указанных моделей рост времени кадра не только увеличивает задержки принятия решения, но и, начиная с некоторого значения, ведёт к значительному увеличению риска R из-за ошибок принятия решения в силу существенно возрастающей вероятности перекрытия и слияния треков звёзд.

Свойством второй и третьей моделей является то, что риск ошибочного решения полностью определяется отношением расстояний между кластерами $E_{(\phi \leftrightarrow i)}$ к значению разброса векторов смаза внутри кластера ε_i : $R = R(E_{(\phi \leftrightarrow i)}, \gamma)$. Если основная составляющая риска связана с наличием шума, то можно считать, что второй член функционала (2.2.10) весьма быстро (по крайней мере экспоненциально) убывает с ростом времени кадра. Это обуславливает обязательное существование минимума функционала (2.2.10).

Для первой модели характерно требование учёта дополнительной составляющей риска ошибочного решения из-за недостаточной чувствительности системы. Для этой модели риск кроме компоненты $R(E_{(\phi \leftrightarrow i)}, \gamma)$ имеет компоненту $R(\Psi)$, которая тем меньше, чем больше отношение Ψ сигнала обнаруживаемого объекта к шуму, которое для неподвижных объектов растёт пропорционально корню квадратному из времени накопления. Это обуславливает обязательное существование минимума функционала (2.2.10), хотя и ведёт к несколько большему значению оптимального времени кадра по сравнению с двумя другими моделями.

Применение критерия (2.2.10) к сюжету рис. 2.2.6–2.2.8 показывает, что при единичных коэффициентах c_t и c_ε время кадра выбрано примерно в 10 раз больше оптимального.

Оптимизация времени кадра имеет близкие черты с автоматической регулировкой времени накопления (АРВН) [33] и перестройкой параметров разложения при ограничении скорости считывания сигналов с фотоприёмной матрицы [76]. Адаптация времени кадра может иметь смысл при изменениях среднего значения модуля вектора скорости фона $M|v_\phi|$, например, в ходе неравномерного движения системы наблюдения. В таких условиях потребуются не только адаптация времени кадра, но и введение в алгоритм обнаружения постоянной коррекции параметров выделенных кластеров в силу возможного «дрейфа» векторов скорости объектов и разбросов внутри кластеров. При реализации алгоритма

с использованием нейронных сетей это явление ведёт к требованию постоянного «дообучения» сети [135].

В силу наличия пространственной дискретизации и бинарного квантования в ходе обнаружения можно принять, что плотность вероятности ошибки измерения вектора смаза объекта финитна. Тогда алгоритм адаптации времени кадра концептуально становится близким к его адаптации при обмене пространственного и временного разрешения при ограниченной скорости считывания изображения с фотоприёмной матрицы [76]. Для работы алгоритма адаптации следует ввести два порога γ_v и γ_n , отличающиеся примерно в два раза ($\gamma_v/\gamma_n = 2 + \delta$, δ – аддитивный компонент, имеющий смысл «технологического» запаса устойчивости системы). Тогда алгоритм формализуется следующим образом:

1. Если $M|v_{\phi}| > \gamma_v$, то следует вдвое уменьшить время кадра T_k .
2. Если $M|v_{\phi}| < \gamma_n$, то следует вдвое увеличить время кадра T_k .
3. Если $\gamma_n \leq M|v_{\phi}| \leq \gamma_v$, то система сохраняет текущее значение времени кадра, т. к. смаз достаточно велик по сравнению с неподвижными объектами и достаточно мал для требуемого быстродействия системы (и для того, чтобы смаз не был слишком велик, в частности, не выходил за пределы раstra).

Применение этого алгоритма адаптации по критерию (2.2.10) к сюжету рис. 2.2.6–2.2.7 показывает, что время кадра будет за три шага уменьшено в 8 раз (на каждом шаге в 2 раза), после чего адаптация остановится, несколько не достигнув оптимального значения, меньшего исходного в 10 раз.

Таким образом, различение сигналов объекта и фона с помощью оптимальных и квазиоптимальных процедур обнаружения подвижного объекта на подвижном звёздном фоне включает:

- пороговое первичное обнаружение;
- сегментацию связных областей, измерение вектора смаза для каждой из них методом авторегрессии;
- межкадровую траекторную обработку для исключения ложных тревог из-за распада пороговых фоновых сигналов на несколько связных областей;
- построение гистограммы распределения векторов смаза;
- разбиение её на кластеры и принятие решения о наличии аномально движущегося объекта сравнением с порогом, определяемым функцией распределения ошибок оценивания векторов смаза объектов, в первую очередь фоновых.

Тестирование алгоритма (не использующего сложных корреляционных методов [131], [34], сложных методов на основе задачи о разладке [133], методов спектрального представления изображения для оценки вектора фона [120]–[123]) показало его достаточную эффективность.

Комплексное рассмотрение телевизионной системы – фотоприёмной матрицы и программно-аппаратных средств обнаружения – позволяет определить оптимальное время кадра, обеспечивающее компромисс между достоверностью и скоростью принятия решения и сформулировать правило адаптации времени кадра к текущему значению скоростного смаза

Обработку видеoinформации на основе априорной информации о спектральных свойствах объектов и фонов рассмотрим на примере обнаружения искусственных спутников Земли (ИСЗ) и космического мусора по оптическим изображениям, формируемым по отражённому ими солнечному излучению [139]. Эта задача, в силу наличия фона звёздного неба, в теории решений относится к классу задач совместного обнаружения и оценивания сигналов, в радиотехнике – к селекции сигналов на сложном фоне. На решение этой задачи нацелено большое количество наземных средств, для которых важны не только проникающая способность телескопов, но и оптимизация электронной аппаратуры, включающей фотоприёмную подсистему и программно-аппаратные средства обработки изображений, ответственные за высокую надёжность обнаружения. Для надёжного решения задачи селекции изображений спутников на фоне звёзд необходимо использовать различие наблюдаемых статистик объектов и фона по всем аргументам – пространству, времени, длине волны. Наиболее часто используются различия в видимой скорости движения объектов и фона (напр., [120]–[126], [128]–[135]) и абсолютные [140], [141] и сравнительные [118] оценки спектральных характеристик материалов покрытий спутников. Известны результаты наблюдений, основанные на совместном учёте позиционной информации (движение) и фотометрической (переменность блеска [142]–[146] в силу изменения фазовых углов ИСЗ и Солнца и смешанного диффузного и зеркального отражения солнечного света от элементов конструкции ИСЗ, а также цветовые характеристики [142]–[146]). Измерения параметров сигналов от спутников и космического мусора основаны на их представлении в виде векторов, включающих блеск в различных спектральных полосах (с использованием светофильтров международной широкополосной фотометрической системы Джонсона [117], [147], [148] $U, W, B, V,$

R , I ; рис. 2.2.9) и фазовые углы ИСЗ и Солнца. Анализ свойств покрытий ИСЗ [118], [140], [141] (рис. 2.2.10, 2.2.11) и наблюдения [141]–[146] (рис. 2.2.12) показали, что имеются некоторые перспективы селекции спутников на фоне звёзд по спектральным признакам (с использованием колор-индексов, вычисляемых как разности блеска выбранного объекта в соседних спектральных диапазонах), основанным на изменении видимого блеска спутников в рамках видимого диапазона с тенденцией его увеличения с увеличением длины волны (рис. 2.2.12 [142], [143]).

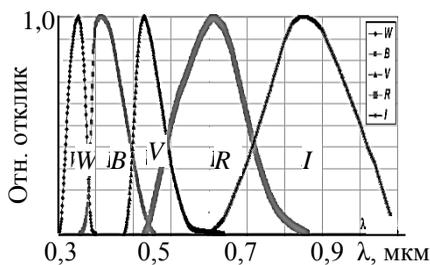


Рис. 2.2.9. Спектральные характеристики оптических фильтров фотометрической системы Джонсона по [117], [147], [148]

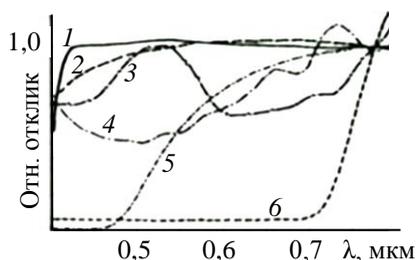


Рис. 2.2.10. Относительные спектральные характеристики отражения различных покрытий¹ согласно [140]

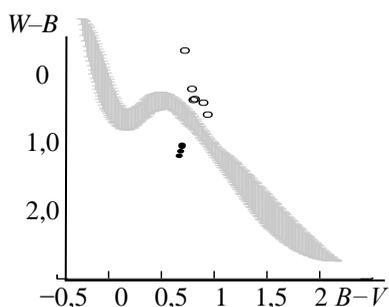


Рис. 2.2.11. Распределение колор-индексов космических объектов (кружки), покрытых различными типовыми материалами, и звёзд главной последовательности [118]

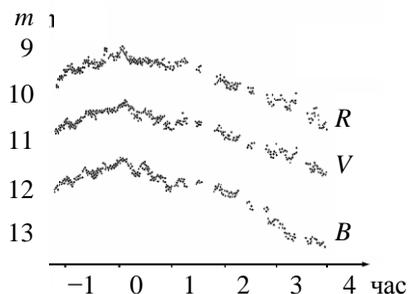


Рис. 2.2.12. Изменения во времени видимого блеска ИСЗ «Интелсат-4», полученные квазиодновременно в полосах B , V , R согласно [142], [143]

¹ 1 – белая краска, 2 – алюминий, 3 – зелёная печатная плата, 4 – солнечная панель, 5 – теплоизоляция с наружным золочением, 6 – чёрнёный алюминий

Ниже уточняются спектральные характеристики спутников и космического мусора (выступающих при селекции их сигналов в роли априорной информации) и перспективы их селекции на фоне звёзд по спектральным признакам.

Наблюдения геостационарных спутников выполнялись на телескопе МТМ-500М ($D = 500$ мм, $F = 4100$ мм), расположенном на северном Кавказе ($\lambda = 42^\circ 39' 45''$, $\varphi = 43^\circ 44' 30''$) [139], [149]. Телескоп оснащён ПЗС-камерой *SBIG STL-1001E* (ПЗС-матрица типа *KODAK KAF-1001E*, содержащая 1024×1024 пикселей размером 24×24 мкм), а также набором светофильтров *BVRI* международной широкополосной фотометрической системы. Поле зрения инструмента составляет примерно $21' \times 21'$ (угол зрения пиксела $1,23''$).

Для наблюдений были выбраны сравнительно яркие спутники «*Astra*», принадлежащие европейской телекоммуникационной компании *SES*. Часть наблюдений велась со светофильтрами, часть без них. При наблюдениях без фильтров использовались два режима: с включённым часовым механизмом (слежение за звёздами) и с выключенным (слежение за спутниками). При наблюдениях с фильтрами использовался режим слежения за спутниками. Экспозиция варьировалась от 1 до 5 секунд.

На изображениях рис. 2.2.13 (полученных 31 июля 2016 г. без фильтров с экспозицией 1 с) видны группы из четырёх спутников. В зависимости от режима слежения изображения звёзд, или спутников растянуты в виде треков длиной примерно 12 пикселей.

Наблюдения спутников и обработка их сигналов затруднены тем, что спутники движутся относительно звёздного фона. При увеличении времени экспозиции для накопления сигнала от выбранных объектов (звёзд или спутников), за которыми следит телескоп, изображения других объектов будут растягиваться во всё более длинные треки. При обработке кадров точность извлекаемой координатной и фотометрической информации с увеличением длины трека не увеличивается, но при этом усложняется процедура разделения сигналов соседних звёзд [149]. Поскольку для получения конечного результата необходимы измерения и спутников, и звёзд (звёзды используются в качестве астрометрических и фотометрических опорных объектов), то приходится искать компромисс, приводящий к предельно допустимой длине трека примерно 1 минута дуги (около 50 пикселей в масштабе использованного инструмента), что соответствует экспозиции 5 с.

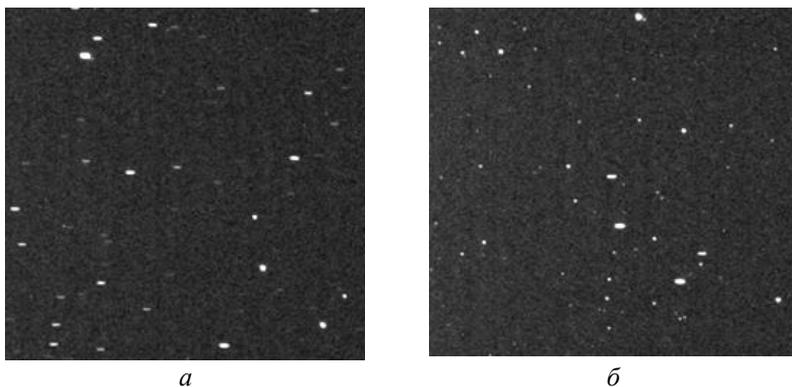


Рис. 2.2.13. Изображения звёзд и спутников: в режиме слежения за спутниками, изображения звёзд смазаны – *а*; в режиме слежения за звёздами, изображения спутников смазаны – *б*

Обработка видеoinформации выполнялась с помощью программного пакета *APEX-II*, созданного в Пулковской обсерватории [150]. Программа выполняет калибровку кадра, выделяет на нём изображения объектов и звёзд, определяет центры этих изображений, а также оценивает количество света, сформировавшее каждое из них, т. е. определяет предварительные (инструментальные) звёздные величины объектов и звёзд. Затем программа отождествляет положения измеренных звёзд со звёздными каталогами, заданными в качестве опорных. Из сопоставления измерений, произведённых на кадре, и позиционной и фотометрической информации о звёздах, содержащейся в каталоге, определяются астрометрические координаты объектов и оценивается их блеск («заатмосферные» звёздные величины). В качестве опорного каталога использовался инфракрасный обзор *2MASS*. Значения блеска звёзд в полосах *BVRI* международной фотометрической системы (в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне) пересчитывались из среднего ИК-диапазона (полос *J* и *K*) по формулам, приведённым в работе [151].

В качестве примера результатов наблюдений приведём короткую серию, состоящей из 10 кадров, полученных без фильтров с экспозицией 1 с в течение примерно двух минут (см. рис. 2.2.13). Использование пакета *APEX-II* в стандартной конфигурации (применяемой при наблюдении астероидов) на кадрах со звёздными треками позволяет определять слишком мало звёзд (от одной до пяти), подходящих в качестве опорных для фотометрической обработки. В результате вычисляемые звёздные величины

спутников оказываются неверными и сильно отличающимися друг от друга на разных кадрах (хотя большая часть инструментальных значений блеска, измеренных на кадрах, вполне соответствовала друг другу). Обработка кадров, снятых с использованием часового ведения, на которых изображения звёзд являлись «точечными», а изображения спутников выглядели как треки, обеспечивает существенно более надёжные результаты, так как в качестве опорных использовалось около пятидесяти звёзд.

Результаты наблюдения иллюстрируют графики рис. 2.2.14. У спутника s_3 точки 1, 6 и 7, а у спутника s_4 точка 7 измерены с сильными искажениями. Это связано с «наполнением» изображений спутников на изображения звёзд.

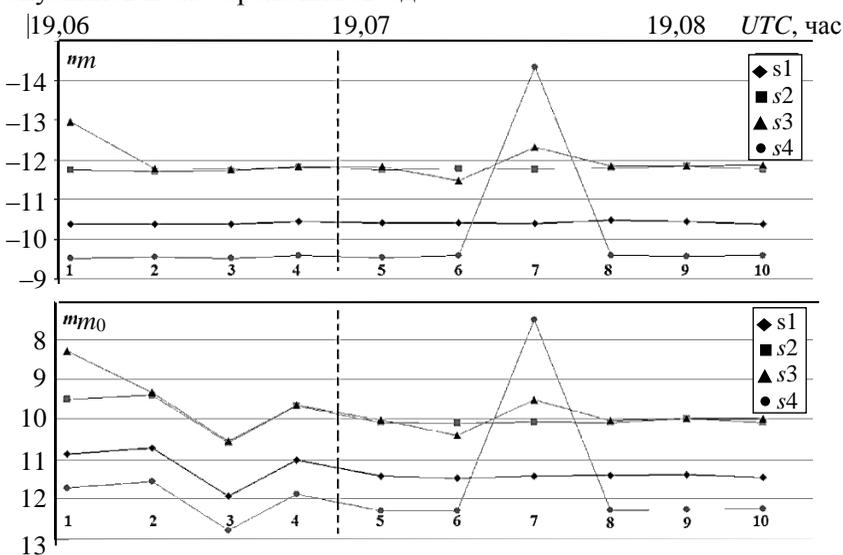


Рис. 2.2.14. Результаты наблюдения четырёх ИСЗ: инструментальные звёздные величины m (вверху), вычисленные с использованием звёздного каталога значения m_0 (внизу); по оси абсцисс – время съёмки кадров; вертикальная пунктирная линия отделяет кадры, снятые без часового ведения (1–4), от кадров с часовым ведение (5–10)

Для надёжного измерения спутников следует снимать множество кадров, чтобы получить возможность выявления и исключения таких искажений. Для первых четырёх кадров, снятых без часового ведения, из-за малого количества опорных звёзд трансформация блеска к истинным значениям выполнена с ошибкой. Для остальных шести кадров (содержащих «точечные» изображения звёзд) трансформацию можно считать корректной.

Для повышения точности измерения треков в пакет *APEX-II* были дополнительно включены специальные алгоритмы. Результаты обработки модифицированным алгоритмом проиллюстрированы графиками на рис. 2.2.15, выполненными с теми же обозначениями, что и на рис. 2.2.14. На верхней панели, где приведены значения блеска m спутников, измеренные на кадрах, видно, что измерения искажённых изображений (точки 1, 6 и 7 спутника s_3) выполнены иначе, нежели раньше. При измерении спутника s_4 на кадре 7 алгоритму, по-видимому, удалось разделить изображения спутника и звезды и выполнить измерение правильно. Новый алгоритм измерения треков позволил увеличить количество используемых опорных звёзд. На кадрах 1–4, содержащих треки звёзд, их число составило около 40. В результате получены адекватные вычисленные заатмосферные значения блеска m_0 спутников (см. нижнюю панель рис. 2.2.15) [139].

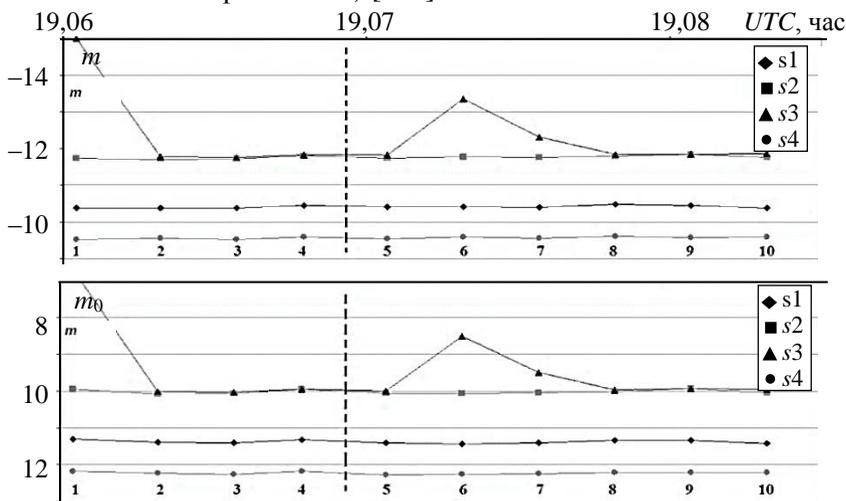


Рис. 2.2.15. Результаты наблюдения четырёх ИСЗ: инструментальные звёздные величины m (вверху), вычисленные с использованием звёздного каталога значения m_0 (внизу) (модифицированный алгоритм измерения треков)

С целью оценки изменения блеска ИСЗ в течение длительного времени (в дополнение к известным результатам о его периодическом изменении из-за вращения спутников [142]–[146]) в режиме слежения за спутником были проведены наблюдения одного из них на интервале более двух часов (рис. 2.2.16).

Резкие изменения блеска спутника (перерыв в кривой блеска) связаны с вхождением его в тень Земли и выходом из неё. Повышенный блеск вблизи границ земной тени вызван уменьшением угла фазы в этом месте (вблизи противостояния).

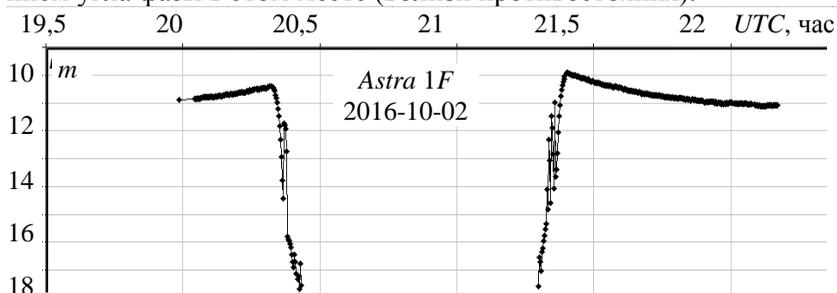


Рис. 2.2.16. Изменение блеска ИСЗ в течение длительного времени

Для определения цветовых характеристик спутников были выполнены наблюдения с использованием *BVRI* светофильтров международной широкополосной фотометрической систем Джонсона [117], [147], [148]¹.

При съёмке кадров с использованием светофильтров на ПЗС-матрицу попадает значительно меньшее количество света. В первую очередь это касается фильтров с более узкой полосой пропускания — *V* и, особенно, *B*. Для накопления достаточного количества света от объектов приходится увеличивать время экспозиции, то есть удлинять треки. Кроме того, на кадре становится меньше изображений звёзд, пригодных для использования в качестве опорных.

В качестве примера приведём результаты обработки наблюдений той же группы из четырёх геостационарных спутников. Наблюдения выполнялись со светофильтрами *BVRI* при остановленном часовом механизме телескопа (изображения спутников «точечные», звёзд — треки) и с длительностью экспозиций 5 секунд. Последовательность смены фильтров была следующая: *BVRI–BVRI–BVRI*.

Видно (рис. 2.2.17), что хорошо проявившихся звёзд (треков) при фильтре *B* гораздо меньше, чем при фильтре *I*. В этом случае использование модифицированного алгоритма обработки треков

¹ Стекланный мениск, входящий в оптическую схему телескопа МТМ-500М, поглощает излучение в ближней ультрафиолетовой области и не позволяет проводить наблюдения с фильтрами *W* и *U*.

ситуацию улучшило незначительно. Удалось выделить, измерить и отождествить больше звёзд, однако точность измерения точечных объектов (спутников) сильно упала. Для повышения точности измерений обработка кадров осуществлялась дважды: с настройками для треков (измерение и отождествление звёзд) и для точечных объектов (спутников) с привязкой измеренного блеска спутников к звёздам «вручную».

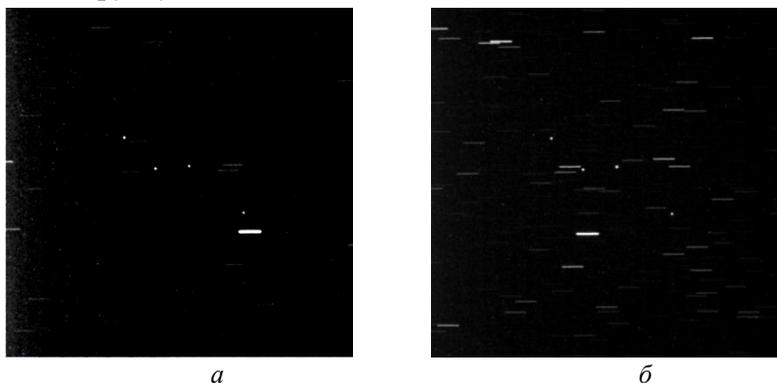


Рис. 2.2.17. Изображения спутников и смазанных звёзд при наблюдении: с фильтрами V – a ; с фильтрами I – $б$

Наибольшие затруднения в обработке видеоинформации вызвали кадры при фильтре V . На первом кадре программа смогла подобрать всего 5 опорных звёзд, на втором только одну, на третьем ни одной. На кадрах с фильтром V она выбрала более десятка пригодных звёзд, R – три-четыре десятка, I – четыре-пять десятков. Фильтры V , R и I оказались пригодны в данном случае для определения цветовых характеристик спутников.

Результаты обработки наблюдений с фильтрами (рис. 2.2.18) показывают возможность оценки показателей цвета $V-R$ и $R-I$ для спутников¹. Предполагается, что блеск спутников может меняться со временем неизвестным образом. В связи с этим для отслеживания

¹ На первом кадре с фильтром R значение блеска спутника $s1$ заметно отклоняется от остальных; это может быть связано с каким-либо дефектом изображения (например, с попаданием космической частицы в его область на матрице). Значения для второго кадра в фильтре V , полученные с опорой всего на одну звезду, по-видимому, неверные; блеск в фильтрах V , R и I ведёт себя адекватно.

возможных изменений при наблюдениях была использована последовательная смена фильтров. Блеск спутника при каждом фильтре интерполируется на моменты получения кадров в другом фильтре.

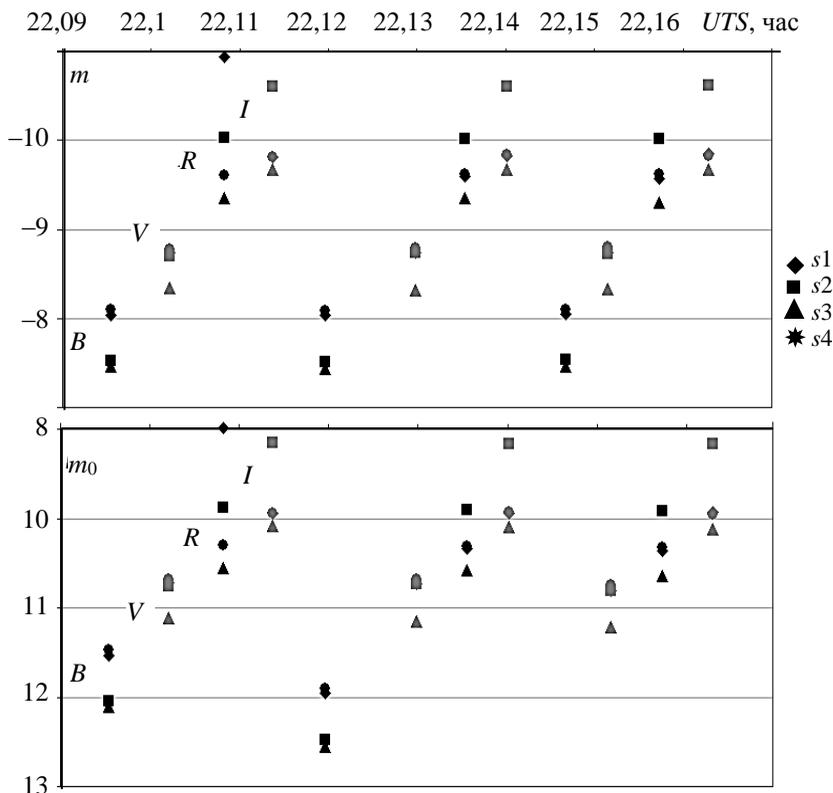


Рис. 2.2.18. Результаты обработки наблюдений с фильтрами; инструментальные звёздные величины m (вверху), вычисленные с использованием звёздного каталога значения m_0 (внизу); разные виды значков соответствуют разным спутникам

Таким образом, получается по 4 пары значений блеска для каждой пары фильтров. Усредняя по 4 разности $V-R$ и $R-I$, получаем средние значения показателей цвета и стандартные отклонения σ_1 , которые предварительно считаем за оценки точности определения показателей цвета. Из-за удаления искажённого значения блеска спутника s_1 на первом кадре R средний показатель $V-R$ для этого спутника получен только по двум значениям, а $R-I$ – по трём. Показатели цвета $B-V$ оценены как разность блеска спутников на первом (более надёжном) кадре B и на

ближайшем к нему по времени кадре *V*. Вычисленные значения приведены в табл. 2.2.1.

Таблица 2.2.1. Показатели цвета спутников (в звёздных величинах) [139]

Спутник	<i>B–V</i>	<i>V–R</i>	σ_1	<i>R–I</i>	σ_1
<i>s1</i>	0,75	0,43	0,03	0,41	0,02
<i>s2</i>	1,29	0,86	0,03	0,75	0,01
<i>s3</i>	1,00	0,58	0,01	0,50	0,02
<i>s4</i>	0,79	0,39	0,03	0,37	0,01

Цветовые характеристики ИСЗ и космического мусора определяются свойствами различных частей спутника. В основном это панели солнечных батарей, антенны и покрытие корпуса спутника [140], [141]. Вместе с тем все ИСЗ для обеспечения теплового режима оснащены экранно-вакуумной теплоизоляцией (ЭВТИ). Для нескольких образцов таких покрытий были выполнены лабораторные измерения спектральной отражательной способности (рис. 2.2.19*a*). Для оценки наблюдаемых спектров спутников, покрытых такими материалами, эти кривые следует умножить на спектр излучения Солнца¹. На панели рис. 2.2.19*б* верхняя кривая, нормированная на максимум к единице, представляет спектр Солнца, а три другие кривые – результаты его умножения на спектры отражения трёх образцов ЭВТИ (были выбраны три наиболее отличающихся друг от друга образца.)

Чтобы оценить наблюдаемые показатели цвета этих образцов был применён метод «синтетической фотометрии», для чего полученные кривые были умножены на пять кривых реакции полос международной фотометрической системы (рис. 2.2.9). Значения для полос *W*, *B* и *V* взяты из [148], а для полос *R* и *I* из [152]. Результаты умножения – кривые реакции в полосах данной фотометрической системы на свет, принимаемый от спутников, были проинтегрированы по длине волны, а результаты интегрирования переведены в звёздные величины. Попарные разности этих величин для различных полос дали оценки показателей цвета этих трёх материалов (табл. 2.2.2). Для их нормировки аналогичная процедура была произведена со спектром Солнца и были использованы значения показателей цвета Солнца средние из нескольких различных публикаций.

¹ Спектр Солнца в диапазоне 350...1051 нм взят из статьи [153] и расширен до диапазона 200...1200 нм с помощью спектра звезды класса *G2 V* из работы [154].

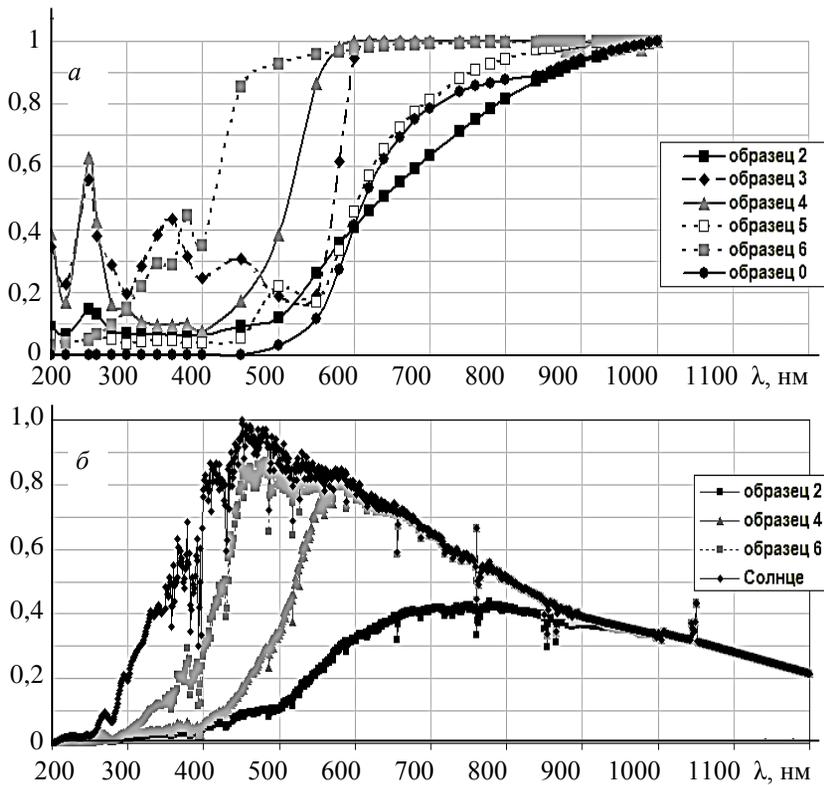


Рис. 2.2.19. Нормированные спектры отражения образцов ЭВТИ – а; спектры отражения ими излучения Солнца – б

Таблица 2.2.2. Показатели цвета трёх образцов покрытия корпусов спутников при освещении их Солнцем (в звёздных величинах)

	$W - B$	$B - V$	$V - R$	$R - I$
Образец 2	0,57	1,78	1,29	0,79
Образец 4	0,94	2,09	0,65	0,33
Образец 6	1,08	0,97	0,40	0,34

Для сравнения с полученными выше цветовыми характеристиками спутников и покрытий были взяты показатели цвета звёзд из двух источников. Во-первых, были использованы несколько звёзд, которые наблюдались одновременно со спутниками, т. е. присутствовали на кадрах, полученных при наблюдениях спутников с использованием светофильтров. Из-за движения геостационарных спутников на фоне звёзд всего пять звёзд удалось надёжно измерить

на кадрах, наблюдаемых в трёх различных фильтрах (V , R и I), и, тем самым, использовать для них два показателя цвета.

Во-вторых, для сравнения спутников с большой совокупностью звёзд был привлечён фотометрический каталог [117], содержащий значения блеска в полосах W , B , V и R для более чем 13,5 тыс. звёзд. Таким образом, имеются следующие показатели цвета для четырёх типов объектов (табл. 2.2.3).

Таблица 2.2.3. Показатели цвета (кolor-индексы) различных объектов

1.	Образцы покрытий	$W-B$	$B-V$	$V-R$	$R-I$
2.	Наблюдённые спутники		$B-V$	$V-R$	$R-I$
3.	Наблюдённые звёзды			$V-R$	$R-I$
4.	Каталожные звёзды	$W-B$	$B-V$	$V-R$	

Для сравнения цветовых характеристик различных объектов (прежде всего, звёзд) в астрофизике применяют так называемые двуцветные диаграммы – зависимости двух показателей цвета. Для имеющегося набора данных имеет смысл использовать две таких диаграммы (рис. 2.2.20, 2.2.21):

- $(B-V) - (V-R)$ для объектов 1, 2 и 4;
- $(V-R) - (R-I)$ для объектов 1, 2 и 3.

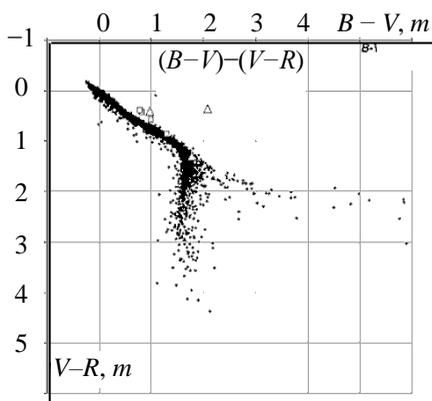


Рис. 2.2.20. Двумерная диаграмма $(B-V) - (V-R)$; чёрные точки – звёзды из каталога [117], квадраты – наблюдаемые геостационарные ИСЗ, треугольники – образцы покрытий

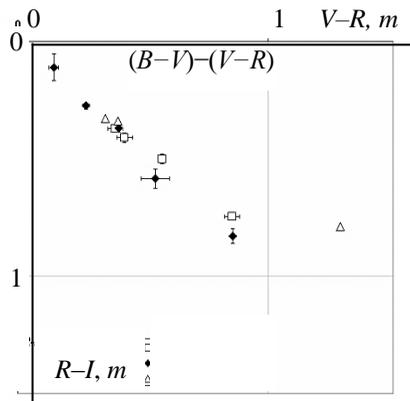


Рис. 2.2.21. Двумерная диаграмма $(V-R) - (R-I)$; чёрные ромбы – наблюдаемые звёзды, квадраты – наблюдаемые геостационарные ИСЗ, треугольники – образцы покрытий

Наблюдения показали, что важная особенность спектральных характеристик отражённого от спутников солнечного света в пределах видимого диапазона состоит в увеличении блеска по мере увеличения длины волны. Этот результат находится в согласии с известными наблюдениями [142]–[145] и имеет дополнительное объяснение в виде спектров отражения покрытий спутников ЭВТИ. Это позволяет считать увеличение блеска при последовательных переходах от коротковолновых спектральных диапазонов к более длинноволновым ($B \rightarrow V \rightarrow R \rightarrow I$; рис. 2.2.12, рис. 2.2.18) устойчивым признаком оптических сигналов от спутников.

Расположение объектов на диаграммах цветности рис. 2.2.20, 2.2.21 показывает, что чёткого разделения кластеров спутников и звёзд по их цветовым характеристикам нет. Этот результат несколько отличается от известного [118] (рис. 2.2.11). Вместе с тем видно, что кластер спектральных образов спутников расположен на краю кластера основной массы звёзд, несколько правее и выше него. Однако включение в рассмотрение более слабых, а значит, далёких, звёзд, более подверженных межзвёздному покраснению, может несколько сместить кластер звёзд вправо. Тем не менее, анализ с помощью таких диаграмм в процессе поиска спутников может позволить «вычистить» из рассмотрения большое количество звёзд, лежащих ниже и левее некоего порога на диаграмме, и облегчить дальнейший поиск. Возможно, совместный анализ трёх–четырёх подобных диаграмм с использованием полосы реакции в ближнем ультрафиолетовом диапазоне (W или U) позволит производить такую селекцию более эффективно (в частности, на основе факторного анализа; см., напр., [155]). Для выяснения этого вопроса требуются развёрнутые исследования с получением новых наблюдательных и лабораторных данных. Эти исследования позволят также определить чёткие критерии (пороги принятия решений о принадлежности каждого объекта к кластеру спутников или кластеру звёзд) для отбраковки звёзд по их цветовым характеристикам.

Селекция сигналов спутников на звёздном фоне в реальном времени (т. е. оценки блеска в каждом спектральном диапазоне не квазиодновременные с последовательным перебором спектральных фильтров) возможна с помощью создания в главном фокусе телескопа нескольких светоделённых каналов со своими спектральными фильтрами для параллельного синхронного накопления сигнала на нескольких фотоприёмных матрицах. Однако этот способ обеспечивает синхронность накопления оптического сигнала ценой

ухудшения чувствительности системы. Самым перспективным вариантом реализации системы является использование матриц с вертикально-совмещенной структурой фотоприёмного пиксела и с разделением считываемого сигнала на несколько каналов, основанном на генерации электронов фотонами различной длины волны на разной глубине кристалла матрицы [36].

Важным свойством технологии изготовления многоспектральных фотоприёмных матриц с вертикально-совмещенной структурой является возможность управления в ходе их проектирования спектральными характеристиками каналов по значениям как центра спектрального диапазона, так и его ширины. Это позволяет оптимизировать фотоприёмные матрицы не только для массового применения в цветном телевидении с разделением каналов красного, зелёного, синего (R, G, B), но и для астрономических наблюдений с разделением на каналы B, V, R . Наличие в технологии формирования глубоких изолирующих карманов позволяет выделить четвёртый диапазон ближнего инфракрасного спектра I . Пятый ультрафиолетовый спектральный диапазон W может быть получен на поверхностном поликремниевом фотодиоде вне кремниевой подложки [156].

Основной методологической задачей применения многоспектральных приёмников является коррекция результатов наблюдения для компенсации отличий реальных спектральных характеристик матрицы от использованных при составлении каталога [117]. По телевизионной терминологии эта задача относится к цветокоррекции, по астрономической – к трансформации измерений из инструментальной цветовой системы в стандартную [147], [148], [151]. Оба эти подхода опираются на измерения спектральных характеристик реального фотоприёмника и калибровку наблюдения по эталонным объектам (звёздам известных спектральных классов).

В астрономии методика решения этой задачи достаточно подробно разработана [147], [148], [157], [158]. Связи между двумя фотометрическими системами выражаются уравнениями трансформации, связывающими показатели цвета (колор-индексы) разных систем или разность звёздных величин в фотометрических полосах разных систем с каким-нибудь из колор-индексов. То есть, это связи вида $C_2 = f(C_1)$ или $m_2 - m_1 = f(C_1)$, где C_1 и C_2 – колор-индексы звезды в первой и второй системах, а m_1 и m_2 – значения блеска звезды в этих системах. Для приведения измерений, выполненных в цветовой системе конкретного инструмента, могут быть использованы два метода – наблюдательный и численный.

При первом методе на инструменте наблюдается большая совокупность звёзд, имеющая надёжные значения цветовых характеристик в стандартной системе. Например, для системы *UBVRI* такие звёзды находятся в так называемых площадках Ландольта, расположенных вдоль небесного экватора и доступных для наблюдения практически из любой точки Земли [157]. Также можно использовать некоторые звёздные скопления. Второй способ – численное интегрирование. Зная распределение энергии $I(\lambda)$ в спектре излучения различных типов звёзд и спектральные кривые всех полос реакции $\varphi(\lambda)$ инструментальной и стандартной систем, можно численно определить значения блеска этих звёзд:

$$m = -2,5 \lg \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda + \text{const.}$$

Можно также учесть межзвёздное покраснение различной степени, домножив подынтегральные выражения на кривую закона покраснения $\tau^x(\lambda)$. Возможно использование двух типов табулированных спектральных кривых различных звёзд: спектрофотометрические измерения реальных звёзд (например, [158]) и – средние спектральные кривые различных типов звёзд (например, [154]).

В общем случае связь между двумя фотометрическими системами нелинейна; она может представляться полиномами различной степени или несколькими отрезками линейной функции. Для разных типов звёзд зависимости могут отличаться. Но, если кривые реакции полос двух систем очень близки между собой, то уравнения связи будут, скорее всего, линейными; в противном случае они будут сложнее и менее однозначными, что приведёт к потере точности при трансформации результатов наблюдений. В связи с этим при разработке и изготовлении светоприёмной аппаратуры возникает задача добиться максимальной близости полос реакции инструментальной системы к стандартной (с учётом всех спектральных свойств оптического тракта инструмента).

Проведённые многоцветные фотометрические наблюдения спутников «*Astra*» на телескопе Пулковской обсерватории МТМ-500М показали [139], что спектральная селекция спутников на фоне звёзд имеет перспективы реализации в части существенного сокращения количества фоновых звёзд, хотя и не может обеспечить безошибочной классификации. Это означает, что спектральная селекция в прикладных задачах обнаружения спутников будет средством, дополнительным к селекции по видимой скорости их движения.

2.3. Кодирование источника

Оба вида кодирования – как источника, так и канала, в телевизионной системе неоднократно чередуются. Например, накопление сигнала в пикселе фотоприёмника относится к кодированию источника, а считывание сигнала с фотоприёмника (развёртка) – к кодированию канала; при цифровом кодировании также сначала осуществляется кодирование источника (сжатие информации), затем кодирование канала.

Кодирование источника в телевидении разделяется на кодирование в ТВ камере (в первую очередь – в фотоприёмнике) и в цифровом кодере. При этом при кодировании источника в широком смысле, когда по изображениям принимаются решения (например, распознавание образов и оценка их параметров, см. табл. 2.1.1), требуемое сжатие сигналов распределяется примерно поровну между ТВ камерой и устройством принятия решения: при чрезмерном сжатии в ТВ камере растут ошибки принятия решения, при недостаточном сжатии в ТВ камере растёт требуемая сложность вычислительной подсистемы, во многом расходуемая на обработку шумовой информации [34]. В этом разделе кодирование источника рассматривается в традиционном (узком) смысле, соответствующем использованию простой модели сигнала, не разделяемого на объекты и фоны.

Сжатие информации традиционно подразделяют на обратимое (без потерь) и необратимое – с потерями информации. При этом сжатие в широком смысле, т. е. при распознавании образов и обнаружении объектов на сложном фоне и оценке их параметров, может быть одновременно и без потерь информации – например, о координатах обнаруживаемого объекта, и с потерями информации – о форме сигналов объектов и фонов. Это различие в соотношении потерь информации соответствует различию в классической теории решений между фильтром Норта (согласованным с априори известной формой сигнала) и фильтром Винера (согласованным с априори известным спектром случайного сигнала).

Цифровое кодирование источника с потерями информации применяются при *распространении* знаний, в космическом телевидении – при формировании и ретрансляции программ телевизионного вещания при опоре на экспертные (субъективные) оценки качества видеоинформации, определяющие её допустимое сжатие. При *добыче* знаний с помощью космического телевидения желательно ориентироваться на цифровое кодирование без потерь информации, которое, в отличие от кодирования в ТВ камере, может быть реализовано.

В ТВ камерах кодирование источника осуществляется всегда с потерями информации, так как кодирование без потерь информации не имеет смысла: количество информации о пространственно-временных координатах и длине волны каждого фотогенерированного электрона необозримо велико и информация о доминантном сигнале утонет во входном фотонном шуме (исключение составляет наблюдение сверхслабых сигналов в астрономии). Поэтому кодирование источника в ТВ камере имеет целью не минимизацию потерь информации, а максимизацию её качества (см. раздел 2.1).

Кодирование источника в телевизионной камере

Б. Оливер [172] в 1952 г., уже во время триумфального шествия теории Шеннона, ядром которой является теорема о блоковом, т. е. цифровом, кодировании, разделяет кодеры на два класса – без задержек и с задержками, и прямо заявляет, что *«телекамеры – пример кодирующих устройств»* (первого класса). Это написано в эпоху аналоговых ТВ камер, которые Оливер относит к кодерам, осуществляющим *«однозначное преобразование сообщения в новую физическую переменную»*. Он считает, что эти кодеры в отличие от блокового кодирования «не требуют памяти и обладают малой и постоянной задержкой». Первый тезис – разделение Оливером кодеров на два класса – большинством разработчиков был забыт, и рассмотрение ТВ камер как кодеров в [34] вызывало удивление, потому что в ТВ камерах *в явном виде* не было арифметических и логических устройств, а то, что *развёртка – это кодирование канала*, в глаза не бросалось. Вторая мысль Оливера (хотя и чрезмерно упрощает кодирование в ТВ камере) проясняет причину распространённого заблуждения об отсутствии кодирования в ТВ камере: он утверждал, что для правильного учёта статистических свойств сигнала необходимы *память и задержка*. Конечно, современные кодеры цифрового телевидения, используя память и задержку, весьма неплохо учитывают статистические свойства сигналов, *дополняя* кодирование в ТВ камере. Если следовать Оливеру, то ТВ камера – однозначный преобразователь. Спросим: чего – каждого фотона? Нет. Обладает ли ТВ камера (согласно признакам, используемым Оливером) памятью и задержкой? Несомненно. Мало того, ТВ камера осуществляет накопление по полю и по времени, в твёрдотельных фотоприёмниках в явном виде присутствуют элементы памяти – либо в виде отдельных массивов (ПЗС с кадровым переносом), либо в каждом пикселе (КМОП и ПЗС со строчным переносом). Наличие этих памяти и задержки ведёт

к тому, что сжатие информации, осуществляемое в ТВ камере, на порядок превышает сжатие в последующих цифровых кодерах.

Применение концепции качества информации к сигналам, формируемым ТВ камерой, проведём на уровне синтаксической информации, измеряемой на выходе АЦП с акцентом на ключевых операциях в ТВ камере, ответственных за повышение качества информации – накоплении и квантовании. При этом традиционно (так же, как и в [100], [101], а затем и в [93], [94]) воспользуемся оценкой сверху (без учёта корреляционных связей изображения) количества информации, а также простой формулой информационного риска (2.1.6) без весовых коэффициентов при потере доминантной информации и при шумовой информации. Это позволяет использовать простую формулу для качества информации (2.1.10), в которой все величины измеряются в бит/пиксел.

Для оценки влияния *дискретизации и квантования* на качество информации приведём (2.1.10) к виду, использующему не только число N пикселей, но и число *измеренных* элементов разрешения N_p (из-за шума, влияния ФРТ объектива, смаза и т. п. $N_p \leq N$), а также энтропийную мощность полезного сигнала D_{Hc} (определяемую в предположении о равномерной плотности распределения яркости), *измеренную* дисперсию σ^2 шума на изображении (приняв её гауссовской и одинаковой по всему изображению, равной дисперсии шума на «сером» участке изображения) и энтропийную мощность шума квантования D_{HKB} (определяемую диапазоном амплитуд сигнала и числом уровней квантования):

$$Q = \frac{\frac{N_p^2}{2} \log \frac{D_{Hc}}{\sigma^2}}{\left| \frac{N_p^2}{2} \log \frac{D_{Hc}}{\sigma^2} - N^2 C \right| + \frac{N_p^2}{2} \log \left(1 + \frac{D_{HKB}}{\sigma^2} \right) + \frac{N^2}{2} \log \left(1 + \frac{\sigma^2}{D_{HKB}} \right)}. \quad (2.3.1)$$

Подчеркнём, что при оценке *качества изображения* число уровней квантования ранее рассматривалось преимущественно в ключе «чем меньше уровней квантования, тем хуже» [109], [166], и лишь в некоторых работах (напр., [173]) рассматривается оптимизация числа уровней квантования при обработке зашумлённых сигналов (с энергетической, а не информационной позиции). Концепция качества информации (которое не следует отождествлять с качеством изображения; см. раздел 2.1), даёт иную картину: существует максимум качества информации при изменении числа

уровней квантования. Измерение качества синтаксической информации, используемой для передачи изображений, не является изменением качества изображения, хотя оно и связано с информационным критерием качества изображения (верхняя граница количества информации в кадре, исчерпывающая информационный критерий, входит в формулы (2.1.10), (2.1.11), является их числителем), включает в себя ранее не учитываемый фактор загрузки канала и получателя шумовой информацией.

Рис. 2.3.1 содержит лишь два примера – с избыточным и оптимальным по критерию максимума качества информации (режим бинирования), рис. 2.3.2 иллюстрирует максимум качества информации при умеренном числе уровней квантования.

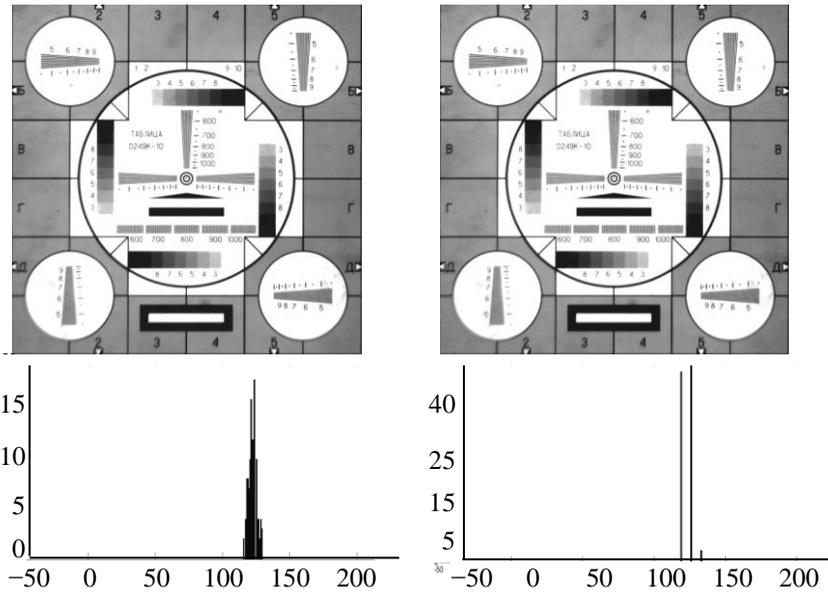


Рис. 2.3.1. Изображение тест-таблицы (вверху); гистограммы шума на уровне серого (внизу); квантование избыточное, $Q = 0,7 \times 10^6$ (слева) и оптимальное $Q = 1,8 \times 10^6$ (справа)

Общность философии дискретизации по полю и квантования амплитуды проявляется в том, что их оптимальность определяется минимумом информационного риска (2.1.1) и (2.1.6); кроме того, при оптимальном квантовании амплитуды сигнала гистограмма шума содержит три отсчёта: так же, как и число отсчётов при оптимальной пространственной дискретизации (3×3) изображения в задаче измерения координат точечных объектов (звёзд) [35], [36].

Так как в формуле (2.3.1) в числителе фигурирует количество потенциальной информации в кадре, то измерение зависимости качества информации от освещённости дало результат, типичный для оценки качества изображений: до определённого предела (насыщение пиксела, после чего в ТВ камере включается автоматическая регулировка времени накопления, АРВН) наблюдается монотонный рост качества (рис. 2.3.3).

Для оценки влияния пространственной дискретизации измерим зависимость качества информации от степени бинирования, т. е. группирования сигналов различного количества пикселей при наблюдении в «жестких» условиях малой освещённости (рис. 2.3.4)

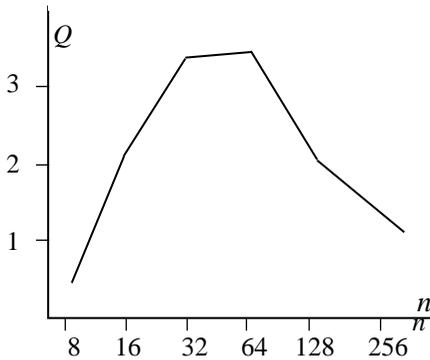


Рис. 2.3.2. Зависимость качества информации от числа n уровней квантования

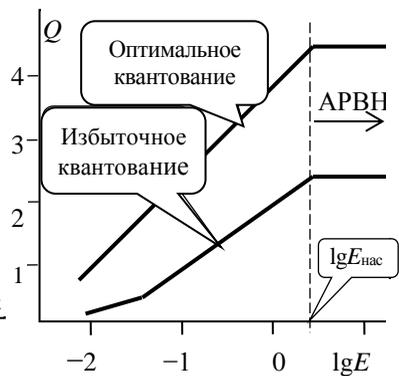


Рис 2.3.3. Зависимость качества информации от освещённости

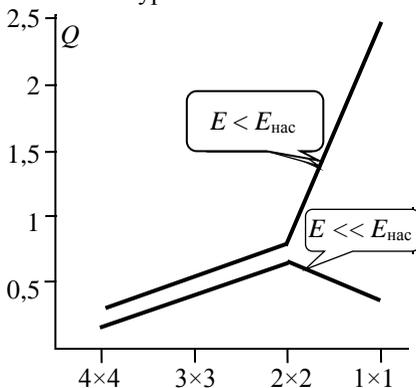


Рис. 2.3.4. Зависимость качества информации от бинирования при различных освещённости

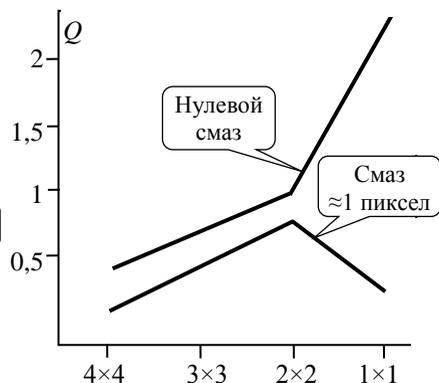


Рис. 2.3.5. Зависимость качества информации от бинирования при скоростном смазе изображения, $E \approx E_{нас}$

или скоростного смаза (рис. 2.3.5); подробнее о влиянии смаза на качество информации см. раздел 2.4.

Измерения качества видеоинформации на выходе ТВ камеры, выявившее наличие максимума качества, теоретически обосновывает широко используемое на практике бинирование в жёстких условиях наблюдения, впервые рассмотренное на начальном этапе твердотельной революции в телевидении [33].

Измерения показали, что при ухудшении разрешающей способности из-за низкой освещённости или скоростного смаза качество информации, вычисляемое по формуле (2.1.10), конечно, уменьшается, но максимум качества смещается в сторону более интенсивного бинирования, т. е. меньшего числа эффективных пикселей после бинирования, причём, чем жёстче условия (ниже освещённость или больше скоростной смаз), тем большее число пикселей следует группировать [91]. Например, ещё в [33] был рассмотрен вариант повышения чувствительности ТВ камеры при группировании 8×8 пикселей, в [34], [35] – варианты группирования 4×4 пикселей, в том числе с переменной по полю чёткостью.

Применение бинирования для повышения качества видеоинформации при наличии скоростного смаза (рис. 2.4.5) методологически очень близко к рассмотренному в разделе 2.3 методу взаимобмена чёткости и кадровой частоты и является его частным случаем, соответствующим изменению лишь одного параметра – чёткости без изменения кадровой частоты. Также как и при малых освещённостях, чем жёстче условия, т. е. чем больше скоростной смаз, тем большее число пикселей следует группировать.

Цифровое кодирование источника

Цифровому кодированию источника (сжатию информации) в приложении к изображениям, как к отдельным кадрам, так и к их последовательностям, посвящена обширная литература (отметим лишь [14], [17], [51], [108], [109], [166], [173]–[177]). Не повторяя известное (и используемое в теории и на практике), охарактеризуем лишь новые аспекты концепции, развиваемой научной школой НИИ телевидения [35], [41], [75]–[77], [90]–[92], [165], [178]–[180].

Потребность в сжатии видеоинформации была осознана давно – достаточно вспомнить идею малокадрового метода сжатия (в соответствии с принятой тогда терминологией – сокращения полосы частот), разработанного С. И. Катаевым в 1935–1937 гг.

Для любой практической системы цифрового кодирования источника должен быть теоретический образец. При этом при кодировании с переходом к спектральной области (когда на основе

понятий энтальпии-энтропии усекается число спектральных коэффициентов) таким эталоном является разложение Карунена–Лоэва, обеспечивающее максимальную скорость сходимости ряда [115], [177]; при кодировании с потерей информации – это понятие скорости при заданном искажении [85] (энтальпии-энтропии [86]); при кодировании зашумлённых сигналов – это понятие верхней границы качества информации ([90], см. раздел 2.1). Для всех этих вариантов кодирования эталоном, *в первом приближении*, должна служить идеальная по Шеннону система, обеспечивающая приближение к равенству пропускной способности и энтропии, т. е. достижение максимального качества информации.

Вместе с тем К. Шеннон отмечал, что идеальная с этой точки зрения система характеризуется стремящимися к бесконечности сложностью кодера и декодера и задержками при кодировании и декодировании [85]. Это неудобное для практики положение привело к тому, что было осознано, что требуется *второе приближение к эталону*, и в круг учитываемых показателей качества работы кодера необходимо включать не только меру приближения к энтропии, а ещё и величины, входящие в опорную триаду синтеза: *«Оптимизацию видеокodeка надо делать (минимум) по трём параметрам: по битовой скорости, по искажению и по вычислительной сложности. Все они влияют друг на друга. Например, оптимизация соотношения скорость/искажение достигается за счёт повышения сложности кодирования, "быстрые" алгоритмы оценки движения часто имеют низкую вычислительную сложность за счёт снижения эффективности кодирования и т. д. Эффективность кодирования и сложность кодирования являются настоящими антиподами»* [174].

Сначала остановимся на указанном первом приближении к эталону кодирования. При оценке качества видеoinформации важно знать значение энтропии конкретного источника. Известно, что скорость создания информации определяется логарифмом отношения энтропийной мощности сигнала к дисперсии задаваемой (минимальной) ошибки, при этом энтропийная мощность является также «ошибкой в схеме одношаговой экстраполяции гауссовского источника» [175]. Для двумерных изображений одношаговая экстраполяция (дисперсия межэлементной разности) является слишком грубым приближением к энтропийной мощности, лучшее приближение можно получить с помощью «декоррелирующего» фильтра вычитания из сигнала текущего пиксела среднего значения сигналов всех восьми окружающих его пикселов (фильтра

«выделения контуров» [176]). Но для негауссовских плотностей вероятности сигналов (каковы практически все изображения) и этот фильтр, хотя и даёт лучшее приближение к энтропийной мощности, не полностью декоррелирует изображение, которое ещё далеко не похоже на шумовое изображение (рис. 2.3.6).

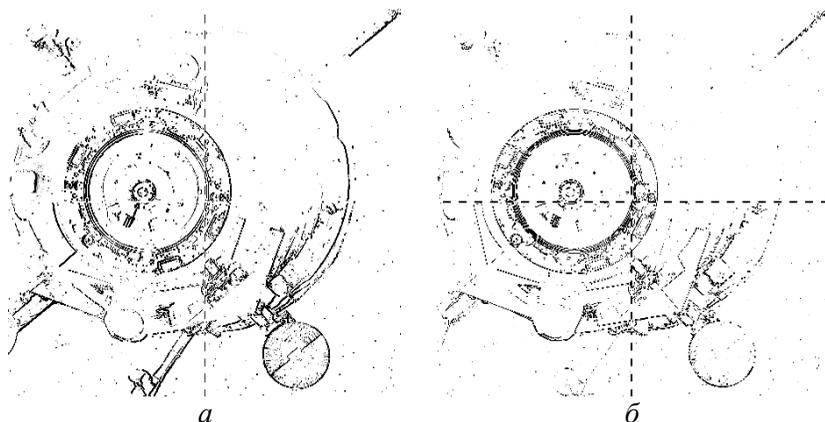


Рис. 2.3.6. Изображение КА (см. рис. 2.4.1): после межэлементного вычитания ($D_{\Delta x} = 78$) – а; после двумерной фильтрации ($D_{\Delta y} = 22$) – б

Модификации двумерного декоррелирующего фильтра с уменьшенными коэффициентами для диагональных направлений (напр., фильтр Собеля [176]) лишь незначительно снижают оценку энтропийной мощности сигнала. Следующее приближение к энтропии источника может быть получено с помощью её вычисления по гистограмме сигнала после декорреляции [85]:

$$\hat{H} = \sum_i p_i \log(1/p_i).$$

Такую оценку энтропии обычно упрощают, считая, что декоррелированный сигнал имеет экспоненциальную (релеевскую) функцию плотности вероятности [176]. Однако для реальных изображений (рис. 2.3.7) такая аппроксимация даёт заниженное значение энтропии (из-за «отсечки хвостов» гистограммы), и при оценке энтропии гистограмму следует рассматривать целиком, без такой аппроксимации.

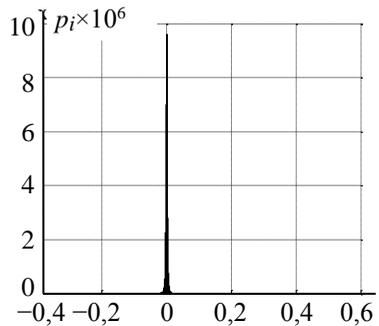
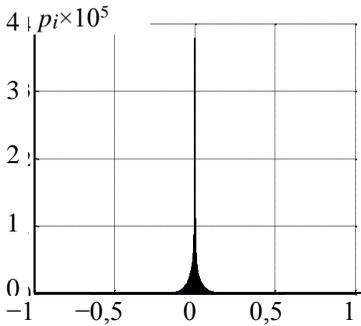
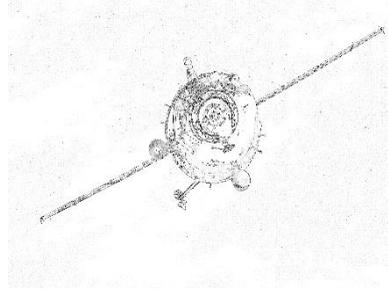
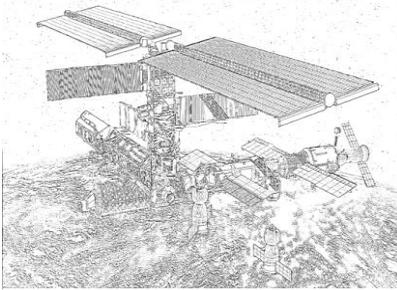
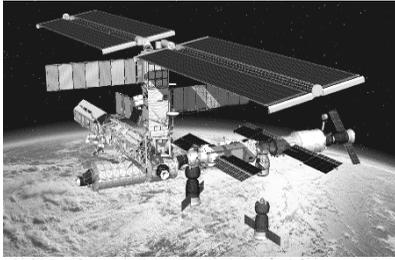


Рис. 2.3.7. Исходные изображения (сверху), декоррелированные изображения (негатив, усилено, средний ряд) и гистограммы декоррелированного сигнала (нижний ряд)

Оценка энтропии для изображений рис. 2.3.6, 2.3.7 позволяет найти зависимости верхней границы качества информации (2.1.10) от коэффициента сжатия, которые показывают, что чем больше энтропия источника, тем большее качество информации можно достичь, но при меньшем оптимальном коэффициенте сжатия (рис. 2.3.8).

Наличие максимума качества информации при столь умеренном сжатии, аналогичном по порядку величины при кодировании с предсказанием для множества сюжетов [176]), соответствует максимальному сжатию *отдельного кадра без потерь*.

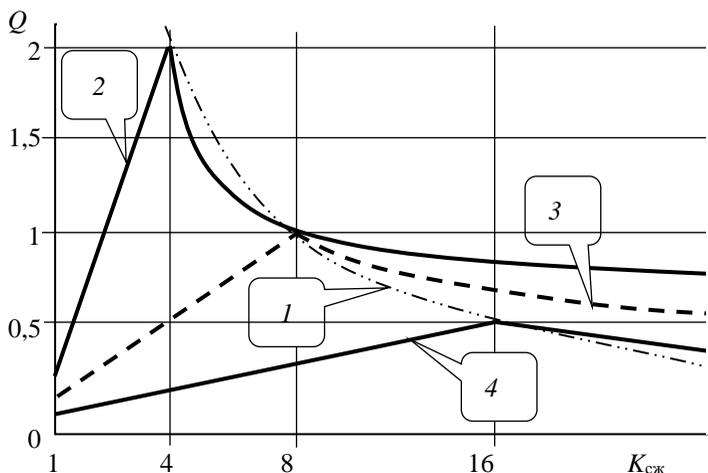


Рис. 2.3.8. Огибающая предельных значений качества информации – 1; зависимости верхней границы качества информации от коэффициента сжатия для изображений с энтропией:

2 бит/пиксел – 2; 1 бит/пиксел – 3; 0,5 бит/пиксел – 4

При сжатии с потерями, например, при измерении параметров объектов известной формы, возможно более существенное сжатие информации, приближающееся к обеспечивающему максимальное качество информации не об изображении, а об оцениваемых параметрах. Например, при сжатии изображения специальной мишени¹, используемой при контроле стыковки КА на теневой стороне Земли и засветки мишени Солнцем, ошибка измерения промаха и паралакса кооперируемых КА аномально растёт при коэффициентах сжатия более 100 для всех методов сжатия (рис. 2.3.9) [160].

Второе приближение к эталону кодирования в ходе статистического синтеза соответствует переходу от предельных оценок качества информации к оценкам условного максимума качества информации при ограничении сложности, т. е. к оценке того, насколько эффективно кодер использует отпущенные ресурсы сложности W .

Практические методы сжатия изображений, рассматриваемого как кодирование источника, подразделяются на два класса: с переходом в спектральную область и без него.

¹ При использовании таких мишеней промах равен нулю при совмещении центра мишени с центром раstra ТВ камеры, соосность стыковочных узлов достигается при устранении паралакса, т. е. при совмещении центров наружного и внутреннего перекрестий.

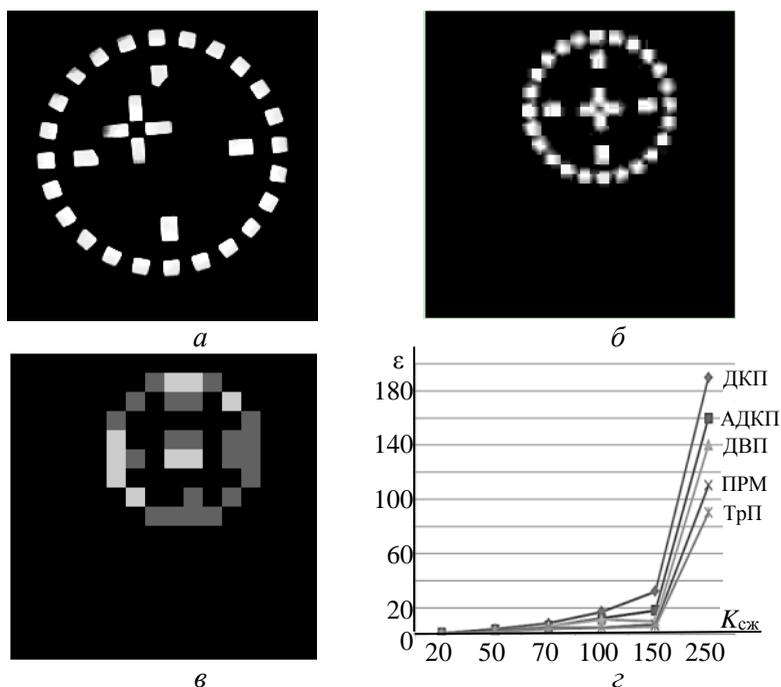


Рис. 2.3.9. Фрагмент кадра с изображением мишени: при сжатии меньше критического – *а*; при критическом сжатии – *б*; при сжатии более критического – *в*; и зависимость ошибки измерения промаха от коэффициента сжатия при различных алгоритмах кодирования – *г*

Примерами кодирования при использовании спектральных преобразований кроме разложения Карунена–Лоэва являются дискретные преобразования Уолша–Адамара, вейвлет-преобразование (ДВП), косинусное преобразование (ДКП), которое может осуществляться при фиксированных размерах фрагментов, или с их адаптацией к корреляционным свойствам изображений (АДКП); без перехода в спектральную область – триангуляционное преобразование (ТрП) с билинейной интерполяцией двумерных поверхностей по совокупности опорных точек и его упрощённая версия – дискретное пространственное преобразование (ДПП) с интерполяцией нулевого порядка двумерных поверхностей и ускоренным рекурсивным поиском опорных точек [35].

Экспериментальные исследования зависимости ошибок передачи и потерь полезной информации от степени сжатия изображений при оценке их формы, так же как и при оценке параметров, подтвердили тезис о связи достижимой ошибки и сложности кодера.

Анализ этих зависимостей [92], [160] (рис. 2.3.10) показывает, что они расположены выше границы, определяемой минимальной ненадёжностью канала по Шеннону (минимальной потерей полезной информации).

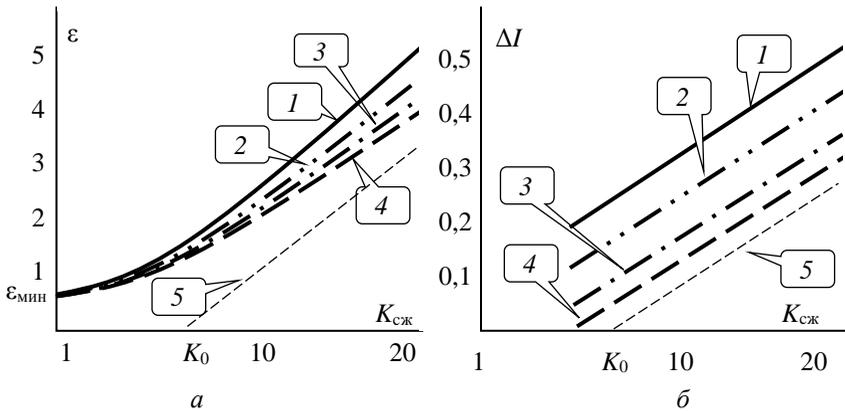


Рис. 2.3.10. Зависимость ошибки (а) и потери информации (б) от сжатия для: ДКП – 1; ДВП – 2; ДПП – 3; ТрП – 4; и предел – 5, определяемый соотношением энтропии источника и пропускной способности

Эта граница (асимптота для реальных графиков рис. 2.3.10а) определяется разностью между энтропией сигнала H и пропускной способностью C_0 , необходимой для передачи сигнала без сжатия, и определяет оптимальный коэффициент сжатия $K_0 = C_0/H$. Введение понятия оптимального коэффициента сжатия позволяет (положив информационный риск R_n (2.1.6) из-за влияния входного шума равным минимальному значению $R_n = 1$) выразить качество информации (2.1.10) всего через два параметра – энтропию сигнала H и относительное сжатие $K = K_{сж}/K_0$:

$$Q = \frac{H}{R_n + H|1 - K_0/K_{сж}|}; \quad Q = \frac{H}{1 + H|1 - K|}. \quad (2.3.2)$$

Так как использование реальных кодеров конечной сложности не позволяет достичь верхней границы качества информации, определяемой формулами (2.1.10), (2.1.11), (2.3.2), то возникает потребность дополнить концепцию качества передаваемой информации учётом сложности кодера, учтя зависимость ошибки передачи как от коэффициента сжатия, так и от доступной сложности кодера (рис. 2.4.11).

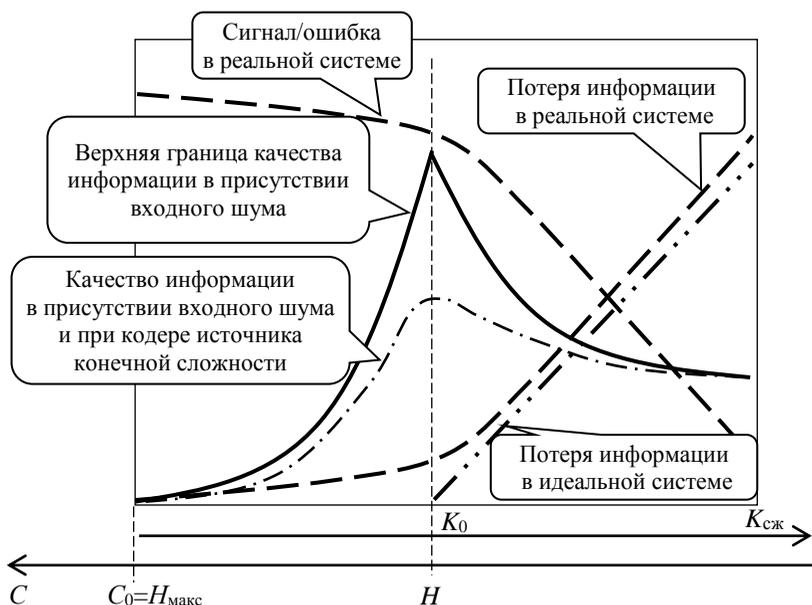


Рис. 2.3.11. Зависимость предельного и реального качества информации от соотношения энтропии источника H и пропускной способности канала C и коэффициента сжатия $K_{сж}$

С этой целью можно ввести обобщённый показатель эффективности кодирования Q_e , введя понятие риска R_W из-за ограниченности вычислительных ресурсов W^1 , отпускаемых на кодер источника. Показатель эффективности использования сложности примет вид:

$$Q_e(W) = \frac{H}{R_C + R_n + R_W}. \quad (2.3.3)$$

Информационный риск из-за ограниченности сложности имеет две компоненты: инструментальную R_{wi} , зависящую от выбранного способа кодирования и меры его близости к оптимальному для конкретного источника, и принципиальную, определяемую эpsilon-энтропией при ограничении сложности кодера источника H_ϵ^W [36], [178]:

¹ Вычислительную сложность выражают либо в битах на пиксел (при программной реализации в операциях на пиксел) [36], [178], при этом W имеет порядок 1...1000, либо целиком в битах на СБИС, например, для кодера на основе трёхмерного ДКП для фотоприёмников до 4×10^6 пикселов $W \approx 3 \times 10^6$ [179], см. раздел 3.3.

$$R_W = \frac{W - H_\epsilon}{H_\epsilon W} + R_{Wi}. \quad (2.3.4)$$

Экспериментальные исследования зависимости информационного риска R_W от способа кодирования и расходуемой сложности (рис. 2.3.12) также показали, что требуемая пропускная способность зависит и от способа кодирования, и от расходуемого ресурса сложности.

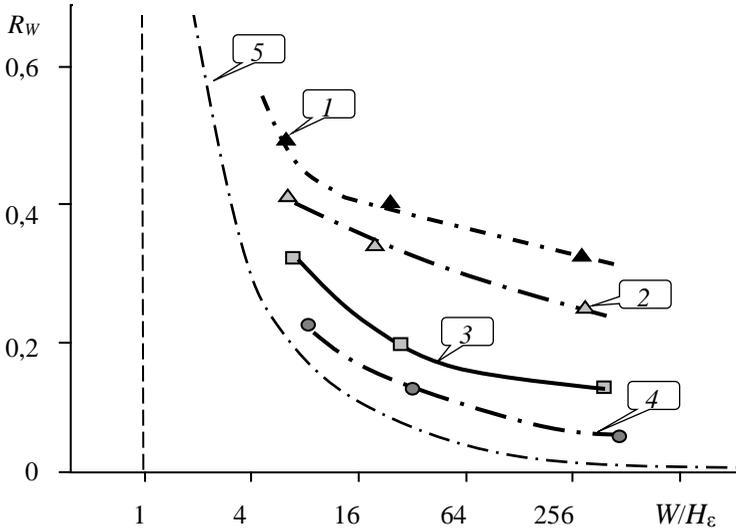


Рис. 2.3.12. Зависимость информационного риска R_W от доступного ресурса сложности W для различных способов кодирования: ДКП – 1, ДВП – 2, ДПП – 3, ТрП – 4 и предел – 5, определяемый энтропией H_ϵ^W при ограничении сложности

В число учитываемых показателей качества кодера источника часто включают задержку θ передачи сигналов. Естественно, что при цифровом кодировании видеоинформации совокупная задержка ограничена снизу временем кадра T_k из-за накопления и считывания сигнала с фотоприёмника. Такой учёт может иметь вид $(\theta + T_k) \leq \theta_{\text{макс}}$, как это имеет место, например, в системах контроля сближения КА. Риск излишней задержки может быть введён в функционал качества информации аналогично учёту ограничения сложности в функционале (2.3.3) через информационный риск R_θ . Для этого, основываясь на вычислении дисперсии D_Δ приращений сигнала через его дисперсию D и интервал корреляции τ , опираясь

на экспоненциальную аппроксимацию автокорреляционной функции сигнала (см. раздел 2.1, [76], [112]) и учитывая существование минимальной ошибки ε_{\min} (обусловленной входным шумом и входящей в риск R_n), можно найти ошибку экстраполяции ε_θ и информационный риск R_θ :

$$Q_e = \frac{H}{R_C + R_n + R_W + R_\theta}; \quad \varepsilon_\theta = D_\Delta = 2D \frac{\theta}{\tau}; \quad R_\theta = \Delta I_\theta = \frac{1}{2} \log \frac{\varepsilon_{\min} + \varepsilon_\theta}{\varepsilon_{\min}}. \quad (2.3.5)$$

Формулы (2.3.3)–(2.3.5) в развитие идеи [174] о синтезе кодера источника по множеству показателей могут быть использованы для построения функционала, аналогичного по назначению функционалу, включающему взвешенную с помощью весовых коэффициентов c_i сумму требуемой пропускной способности, потери информации и сложности кодера [36], [178]:

$$P = \min \{c_0 \Delta I + c_1 C + c_2 W\}. \quad (2.3.6)$$

Концепция качества информации для учёта сложности предполагает синтез формул (2.1.10), (2.1.11), (2.3.2), (2.3.5) с минимизацией суммы входящих в них величин:

$$P = \min \{c_0 [Q_{\max} - Q_e(W)] + c_1 W\}. \quad (2.3.7)$$

При возможности формализации связей потери полезной информации, сложности кодера, скорости передачи, задержки передачи с одним из параметров (например, ошибкой передачи ε) функционалы (2.3.6) и (2.3.7) могут быть использованы для параметрического синтеза кодера источника и позволяют определить оптимальное значение ошибки передачи (по функционалу (2.3.6) оно найдено [36], [178]) и оптимальное значение коэффициента сжатия. Это условное значение коэффициента сжатия может не совпадать с безусловным значением оптимального коэффициента сжатия $K_0 = C_0/H$.

Для экспресс-сравнения различных способов кодирования видеoinформации без параметрического синтеза кодера можно воспользоваться упрощённой формой (не минимизируемой, как в (2.3.7), а максимизируемой), в которой роль весовых коэффициентов играют показатели степени у входящих величин (например, в системах контроля стыковки КА задержка передачи более значима, чем сложность кодера, вследствие чего имеют различные показатели степени) [92]:

$$\tilde{Q}_e = \frac{K_{сж}^2}{\theta \sqrt{\varepsilon W}}. \quad (2.3.8)$$

Для рассмотренных способов кодирования (рис. 2.3.10, рис. 2.3.12) для одинаковых изображений, одинаковых значений ошибки передачи и одинаковой задержки получаем различные значения сложности кодера, и, как следствие, различные значения эффективности кодирования, сведённые в табл. 2.3.1.

Таблица 2.3.1. Эффективность кодирования источника различными методами

Кодер	$K_{сж}$	$W \times 10^3$	$Q_e(W)$	P	\tilde{Q}_e
ДКП	12,3	1	0,67	1,23	0,38
ДВП	13,3	1,5	0,71	1,67	0,36
ДПП	16	3,5	0,77	3,59	0,34
ТрП	18	10	0,83	10,06	0,26

По обоим показателям эффективности использования сложности кодера среди рассмотренных методов ДКП является лучшим (адаптация размеров окон при ДКП, уменьшая ошибки передачи, хотя и несколько увеличивает сложность кодера и декодера, по критериям (2.3.6)–(2.3.8) сохраняет преимущество перед другими способами). Важным дополнительным соображением в пользу ДКП является экспериментальное подтверждение корректности экспоненциальной аппроксимации автокорреляционных функций большинства сюжетов (см. раздел 2.1, [76], [112]), для которых дискретное косинусное преобразование является асимптотически оптимальным, т. е. обеспечивающим максимальную скорость сходимости ряда при достаточно большом числе вычисляемых спектральных компонент [177].

Таким образом, измерение качества видеoinформации на выходе цифрового кодера и эффективности использования вычислительных ресурсов показали, что концепция качества информации позволяет осуществлять параметрический синтез цифровых кодеров источников видеoinформации и количественно сравнивать различные методы при формализации влияния совокупности параметров, включающих коэффициент сжатия, ошибку кодирования и вычислительную сложность кодера.

Максимизация эффективности кодера с учётом ограничения сложности показывает, что дискретное косинусное преобразование, несколько уступая ряду других методов кодирования по приближению к энтропии источника, заметно превосходит их по эффективности использования вычислительных ресурсов [92], [165]. Это обусловило его широкое применение в кодерах семейства *JPEG*, *MPEG* и *EVC*.

Концепция качества информации легко распространяется на кодирование видеопоследовательностей. Практика их кодирования [14], [17], [174] обычно основана на различных подходах к сокращению пространственной и временной избыточности. Если пространственное кодирование в большинстве стандартов семейства *JPEG*, *MPEG* осуществляется с переходом в спектральную область, то временное кодирование реализуют на основе концепции кодирования с предсказанием (дифференциальной импульсно-кодовой модуляции, ДИКМ). При этом для большинства кадров передаётся не само изображение, а так называемая ошибка предсказания – разность действительного изображения данного кадра и предсказанного изображения этого же кадра, которое формируется по известным алгоритмам из изображений ранее переданных кадров. Так как большинство кадров в значительной степени повторяют предыдущие, то ошибка предсказания содержит значительно меньший объём информации, чем исходная видеопоследовательность. Эта идея, использованная в кодерах семейства *MPEG*, известна давно: намечая стратегию развития телевидения, В. К. Зворыкин в 1954 г. писал [84]: *«Могут быть разработаны методы для передачи сигналов изображения, соответствующих различию между соседними кадрами. Так как это различие обычно содержится лишь в небольшой части общего поля изображения, число элементов изображения, которое должно быть передано для обеспечения необходимой чёткости, может быть таким путём значительно уменьшено. Таким образом, передача сигналов различия изображений может быть использована для значительного уменьшения необходимой полосы видеочастот».*

Не останавливаясь на вопросах сокращения избыточности статистическим (энтропийным) кодированием, выравнивающим вероятности передаваемых двоичных символов благодаря учёту различия функций распределения для различных спектральных компонент сигнала, отметим, что стандарты семейства *MPEG* постоянно совершенствуются. Например, в стандарте *MPEG-4 Visual*, предназначенном для использования в системах ТВЧ (кодирование для визуального восприятия с потерей информации; но который может использоваться и в интересах некоторых систем космического телевидения), используются несколько новых приёмов кодирования на основе *объектно-базового принципа*, основанного на разделении изображений на доминантную и фоновую компоненты, кодируемые с различными значениями назначаемой допустимой ошибки передачи. Иным направлением развития этого семейства методов кодирования характеризуется

стандарт *H.264*: он обеспечивает *многоакурсное видеокодирование (MVC – Multiview Video Coding)*, в котором применяется межракурсное предсказание для устранения статистической избыточности. Расширение вычислительных возможностей аппаратных средств позволило разработать новый стандарт *H.265/HEVC (High Efficiency Video Coding)*, в котором осуществляется предсказание с компенсацией движения с *высоким разрешением вектора движения* (увеличено от обычно используемого $\frac{1}{4}$ пикселя до $\frac{1}{8}$ пикселя), а также адаптивный выбор матрицы квантования. Группа *MPEG* сейчас работает над следующим стандартом *MPEG-7*, который позволяет идентифицировать передаваемые изображения без декодирования потока данных. Известны и другие способы компрессии аудиовидеоданных. Например, компания *Microsoft* предложила собственный стандарт сжатия *Windows Media Series 9 (WM 9)* или *Video Coding 1 (VC-1)*, называемый также (*Corona*), который базируется на исходном стандарте *MPEG-4 Visual*.

Все эти стандарты характеризуются ориентацией на визуальное восприятие (распространение, а не генерацию информации) и относятся к кодированию с потерей информации. Постоянный рост допустимой сложности аппаратных средств кодирования (уменьшение весового коэффициента при сложности в формулах (2.4.6)–(2.4.8)), обусловленный достижениями микроэлектроники, позволяют усложнять кодеры для достижения всё большего сжатия при допустимой ошибке передачи, оцениваемой с помощью визуальной экспертизы. Важно, что рост сложности кодеров источника связан с ростом числа пикселей изображения: увеличение чёткости увеличивает интервалы корреляции и стационарности изображений, выраженные в числе пикселей. В частности, выбор фрагментов размером 8×8 пикселей был обусловлен как умеренностью доступной сложности аппаратных средств, так и типичным интервалом стационарности сигналов изображений (см. раздел 2.1). Увеличение размеров кодируемых фрагментов до 16×16 , 32×32 и их адаптация востребованы увеличением интервалов стационарности на различных элементах (по полю и по времени) и поддерживаются ростом доступной сложности.

Например, ведущими мировыми производителями освоено производство ТВ камер, мониторов и цифровых видеопроекторов с пространственным разрешением до 7680×4320 пикселей и частотой кадров свыше 100 Гц. Актуальной практической задачей становится создание не только студийного, но и бортового оборудования, предназначенного для хранения и передачи видеоконтента

в формате *UHDTV1* (3840×2160), отличающемся от современного *HD*-формата (1920×1080) четырёхкратным увеличением «сырого» потока видеоданных. Как и прогнозировалось ранее [35], [165], сжатие такого потока в реальном времени с применением *MPEG*-подобных технологий оказалось затруднительным в силу чрезвычайно высокой вычислительной сложности процедур предсказания и компенсации движения, положенных в основу стандартов *MPEG-2*, *H.264/AVC* (*MPEG-4 Part 10*), *H.265/HEVC* и др. В упрощённом виде суть предсказания и компенсации движения сводится к поиску в текущем и в ранее закодированных (опорных) кадрах множества сходных фрагментов с последующим кодированием разностной информации. Оптимальное предсказание относится к числу трудно формализуемых задач, решаемых методом *полного перебора*, что требует гигантской производительности вычислительных средств. В связи с этим в видеокодерах реального времени используют алгоритмы ускоренного квазиоптимального поиска векторов движения, ухудшающие степень сжатия цифрового ТВ-сигнала. Кроме того, обеспечиваемое такими алгоритмами «ускорение» весьма условно, поскольку на их реализацию приходится до 80% всех временных затрат при кодировании [165]. Таким образом, постоянный рост чёткости и тенденция к повышению точности измерения векторов движения объектов при опоре на стандарты семейства *MPEG* означает следование тупиковой концепции использования переборных задач, которые характеризуются экспоненциальным ростом сложности при увеличении числа вариантов, из которых осуществляется выбор.

Альтернативные подходы к сжатию телевизионного сигнала, исключая предсказание и компенсацию движения, являлись на протяжении последних 15 лет предметом исследований и экспериментов, активным участником которых был и НИИ телевидения. Главным итогом выполненных институтом НИОКР стала разработка инновационной технологии видеокодирования *EVC* (*Efficient Video Coding*) [165], [179], [180] и её успешная практическая реализация в микросхеме 5022BX014 [179] (см. раздел 3.3). Кодек *RVC-1.2*, построенный по той же технологии на основе единого механизма декорреляции по полю и по времени (*трёхмерного дискретно-косинусного преобразования – 3D-ДКП*), отличается адаптивностью и высокой эффективностью. Единство метода кодирования обусловлено квазиоптимальностью (асимптотической оптимальностью) ДКП по всем аргументам для большинства изображений (см. раздел 2.1, [76], [112]).

Технология *EVC* базируется на применении 3D-ДКП как унифицированного механизма сокращения сразу двух видов избыточности видеоряда: пространственной (внутрикадровой) и временной (межкадровой). Основные принципы видеокодирования по технологии *EVC* состоят в следующем. Исходный видеоряд (рис. 2.3.13) разделяется на группы (пакеты) по R смежных кадров, где $R \in \{1, 2, \dots, 8\}$.

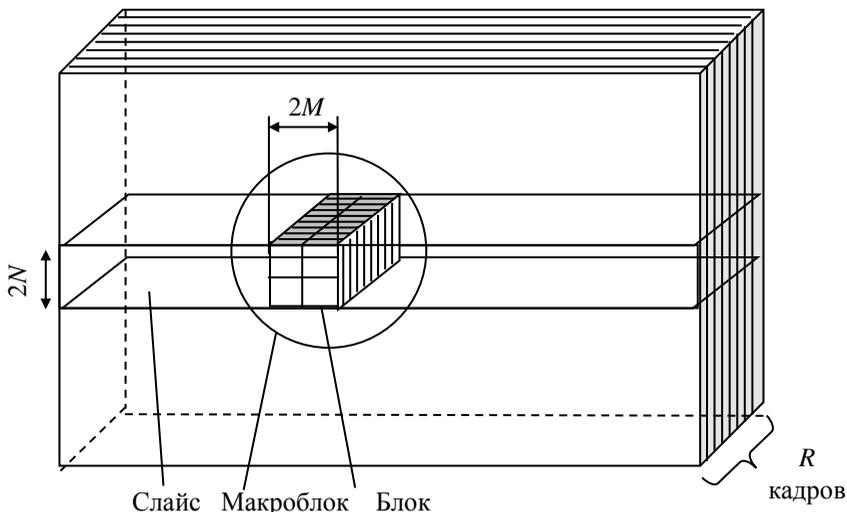


Рис. 2.3.13. Структурные элементы кодирования по технологии *EVC*

Каждый пакет кадров делится в вертикальном направлении на слайсы по $2N$ строк. Слайс представляет собой последовательность макроблоков. При типовой субдискретизации цвета 4:2:0 макроблок содержит 4 трёхмерных блока яркостных отсчётов и 2 трёхмерных блока цветоразностных отсчётов. Все блоки имеют одинаковый размер $M \times N \times R$. Каждый из них разделяется (сплиттируется) вдоль оси времени на субблоки по $M \times N \times R_i$ отсчётов $D(x, y, t)$. Количество I субблоков в одном блоке может находиться в диапазоне от 1 (блок не сплиттирован, т. е. состоит из единственного субблока) до R (предельный случай сплиттирования; субблоки представляют собой $M \times N$ –матрицы отсчётов), причём

$$\sum_{i=1}^I R_i = R.$$

Субблок является наименьшей единицей кодирования, обработка которой включает в себя следующие этапы:

Этап 1 – прямое 3D-ДКП согласно формуле

$$S(m, n, r) = \sqrt{\frac{1}{MNR_i} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{t=0}^{R_i-1} D(x, y, t) A(x, m, M) A(y, n, N) A(t, r, R_i)},$$

где $m = \overline{0, M-1}$, $n = \overline{0, N-1}$, $r = \overline{0, R_i-1}$;

$$A(a, b, c) = \begin{cases} \cos \pi/4 & \text{для } b = 0, \\ \cos \pi \frac{(2a+1)b}{2c} & \text{для } b \neq 0 \end{cases}$$

Результатом прямого 3D-ДКП является в общем случае трёхмерный массив, содержащий $M \times N \times R_i$ трансформант $S(m, n, r)$. При $R_i = 1$ трёхмерное ДКП вырождается в двумерное.

Этап 2 – квантование трансформант.

Этап 3 – прямое сканирование – преобразование трёх- или двумерного массива трансформант в одномерный массив.

Этап 4 – групповое энтропийное кодирование элементов одномерного массива трансформант.

Преимущества технологии EVC перед аналогами:

- на порядок более высокая производительность, обусловленная малой временной сложностью реализуемых алгоритмов кодирования/декодирования данных (рис. 2.3.14);

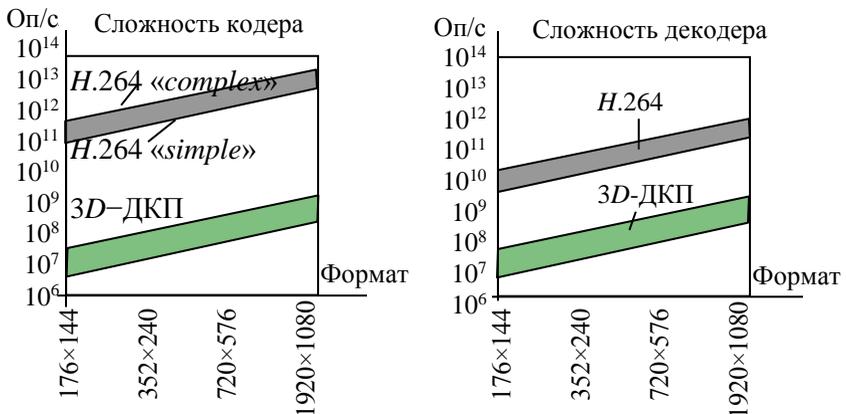


Рис. 2.3.14. Зависимость сложности кодирования и декодирования от формата кадра

- возможность гибкой адаптации используемых алгоритмов как к «глобальным» свойствам видеоконтента, характерного для той или иной сферы применения ТВ-систем, так и к «локальным» свойствам текущего видеоряда (сюжета);
- отсутствие продолжительных трековых искажений (зависаний, разрушения изображения и т. п.), вызываемых ошибками в каналах связи;
- простота аппаратной реализации кодера и декодера.

Сравнительный анализ качества изображения в системах с кодеком *RVC-1.2* и *H.264* показал, что первый, имея существенно меньшую сложность, обеспечивает сопоставимую скорость цифрового потока видеоданных высокой чёткости при одинаковом уровне качества [165] (рис. 2.3.15).

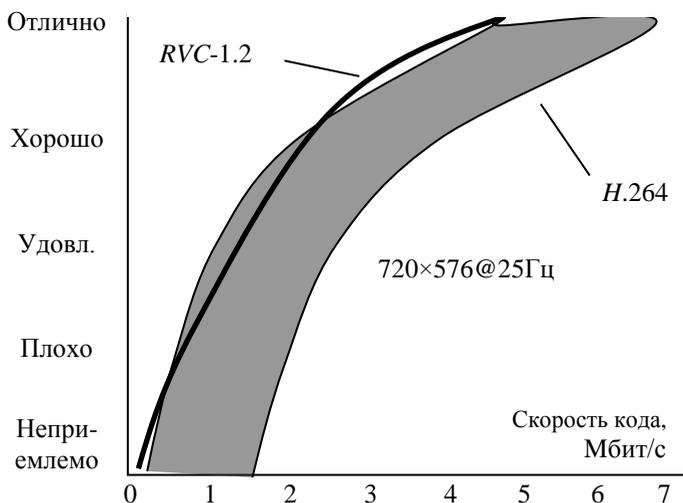


Рис. 2.3.15. Сравнительная характеристика качества кодирования (согласно рекомендации *ITU-R BT.500*) для кодека на основе трёхмерного косинусного преобразования и кодеков семейства *MPEG*

Видекодек *RVC-1.2*, предложенный НИИТ, прост в реализации и требует гораздо меньшее количество вычислительных операций. Международная презентация российской системы видеокодирования состоялась в 2010 г. Эти преимущества обеспечили реализацию метода в виде интегральных схем и их широкого использования в бортовой космической аппаратуре (см. раздел 3.3).

2.4. Адаптация телевизионной системы при сопровождении объектов

Развиваемая в настоящей книге концепция качества информации, во многом ориентированная на кодирование источника, рассмотренное в разделе 2.3, в прикладном телевидении в первую очередь определяет структуру и параметры ТВ камер (параметров разложения изображения в фотоприёмнике). Так как максимум качества информации при наличии скоростного смаза (см. рис. 2.3.5), зависящий от площади зоны накопления (количества суммируемых пикселей), во многом определяется значением скорости смещения объекта в течение времени кадра (времени накопления), то в зависимости от имеющейся априорной информации о сюжете могут быть поставлены две задачи: при постоянном скоростном смазе – оптимизация размеров зоны накопления; при переменном скоростном смазе – адаптация телевизионной системы.

Статистический синтез оптимальных радиоэлектронных систем, опиравшийся на теорию решений, лишь на первом этапе был посвящён решению задач при полной априорной определённости о параметрах сигналов и помех. В классическом труде [164] отмечается, что *«довольно быстро исследователи поняли, что полная априорная определённость является экзотикой применительно к практическим задачам... появились эмпирические идеи, связанные с обучением, самообучением, адаптацией систем»*. При этом на начальном этапе идеи адаптации привлекались на основе интуитивных соображений, а не вытекали из процедуры статистического синтеза. Проблему теоретического обоснования адаптивности систем *приёма* информации удалось решить для *параметрической* неопределённости сигналов и помех. При этом подчёркивается, что при априорной неопределённости и нестационарности (изменяющихся условиях наблюдения) параметры в оптимальной системе автоматически *«выбираются для улучшения качества выполнения функции или, что то же, принятия решений»* [164]. Так как теория решений включает в себя теорию *оценивания*, а формируемую оценку необходимо передавать, ниже будем рассматривать телевизионную систему, формирующую и передающую *оценку* изменяющегося во времени распределения облучённости в выбранной области пространства, с позиций качества переданной несемантической информации (см. раздел 2.1).

При проектировании телевизионных систем первой проблемой, связанной с идеей адаптации, стала максимизация качества

изображения при изменениях освещённости (одного из немногих параметров наблюдаемого сюжета). Для её решения были созданы методы управления параметрами: объективов (автоматическая регулировка диафрагмы, отмеченная даже в [164]), видеотракта (автоматическая регулировка усиления) и фотоприёмников – автоматическая регулировка времени накопления и площади зоны накопления [33]–[36]. При этом адаптация зоны накопления в прикладных системах могла реализовываться не только глобально по всему кадру, но и локально для отдельных объектов в кадре с различной интенсивностью сигнала [35], [36].

Идея адаптации телевизионной системы, декларированная ещё в эпоху электронно-лучевых фотоприёмников [1], но реализованная в полной мере уже в эпоху твердотельного телевидения [33]–[36], оказала влияние на все её подсистемы, включая не только ТВ камеру, но и устройства обработки видеoinформации, ею формируемой, в частности апертурной коррекции и устройств кодирования источника (сжатия информации, см. разделы 2.1 и 2.3). Новыми элементами в адаптации стали учёт изменения динамики различных фрагментов сюжета и изменения условий распространения сигналов в радиоканале (напр., [165], см. раздел 2.5). Вместе с тем в силу влияния на качество информации различных источников шумов и ошибок, предшествующих цифровой обработке видеoinформации, всю возможную адаптацию системы целесообразно реализовать в ТВ камере.

Первым шагом в реализации перестраиваемых твердотельных систем стала оптимизация и адаптация пространственной разрешающей способностью с помощью группирования непосредственно в фотоприёмной матрице сигналов соседних пикселей (бинирования) и временной разрешающей способности с помощью управления кадровой частотой [33]. В результате синтеза оптимальной системы по критерию минимума среднеквадратической ошибки оценивания наблюдаемого случайного поля находят интервалы дискретизации по каждому аргументу (оптимальный размер пиксела и оптимальную кадровую частоту), определяемые соответствующими интервалами корреляции τ_x , τ_y , τ_t и обратными отношению сигнал/шум [33]–[37]. Этот результат соответствует концепции оптимальной линейной фильтрации Колмогорова–Винера, при которой решение уравнения Винера–Хопфа также даёт импульсную характеристику оптимального фильтра, эффективная

ширина которой определяется частным от деления интервала корреляции сигнала на отношение сигнал/шум. Этот результат (справедливый для любого аргумента) позволяет установить оптимальное соотношение между дисперсией $D_{\Delta t}$ приращения полезного сигнала $S(t)$ на интервале дискретизации Δt и дисперсией ошибок ε (суммы шумовых и линейных ошибок) [33], [36]:

$$D_{\Delta t} = M\{[S(t) - S(t - \Delta t)]^2\} = \mu\varepsilon,$$

где μ – численный коэффициент, имеющий смысл порогового отношения сигнал/шум.

Особенностью оптимизации и адаптации твердотельных телевизионных следящих систем являются не только отмеченная в разделе 2.2 дискретность раstra, но и ограниченная скорость считывания изображения с фотоприёмных матриц. Можно было бы подумать, что особенность дискретности раstra не влияет на оптимизацию кадровой частоты, согласуемой с динамикой сюжета. Однако здесь «выступает на сцену» вторая отличительная особенность синтеза телевизионных систем – ограничение скорости считывания изображений. Так, при полной чёткости матричного фотоприёмника (для простоты полагаемую $N \times N$ пикселей) кадровая частота F_k ограничена максимальной скоростью C_0 считывания сигнала с матрицы: $F_k \leq C_0/N^2$.

Если решать задачу максимизации качества информации (в частности, на основе минимума совокупных ошибок оценивания наблюдаемого случайного поля или динамического промаха визирной оси системы относительно наблюдаемого объекта), то может оказаться, что требуемые оптимальные значения размера пикселя и кадровой частоты *одновременно* не достижимы. Отсюда возникает идея *взаимообмена кадровой частоты и чёткости* изображения: на большой дистанции актуальна предельная чёткость изображения, на близкой – предельная кадровая частота. Идея такого изменения [76], [159]–[163] во многом является следствием ***итерационного принципа*** контроля сближения и стыковки космических аппаратов, выдвинутого С. П. Королёвым, и простого правила: ***для каждого сюжета существует свой оптимальный видеоряд.***

При этом основная идея адаптации телевизионной системы к изменению скоростного смаза состоит в том, что при ограниченной скорости считывания сигнала с фотоприёмной матрицы на численное значение смаза оказывает влияние не только изменение площади зоны накопления (числа суммируемых пикселей), но

возможное (или требуемое) изменение кадровой частоты. Так, если увеличить размер зоны накопления, то в силу уменьшения числа считываемых «эффективных» пикселей открывается возможность повышения кадровой частоты для уменьшения значения скоростного смаза.

Синтез адаптивной телевизионной системы наблюдения многомерного случайного поля должен опираться на критерий максимума качества информации [36], [90]–[92], который учитывает и потерю информации из-за дискретизации сигналов по всем аргументам и квантования, и загрузку шумовой информацией получателя (в роли которого может быть и компьютер, в том числе бортовой). Вместе с тем в большинстве реальных систем в силу тактического требования по ширине поля зрения качество информации далеко от своего предела, определяемого свойствами потока фотонов. В результате, реальные телевизионные системы осуществляют дискретизацию многомерного поля облучённостей не столь подробно, как то следует из максимизации качества информации. Указанное свойство проявляется, в частности, в том, что при типичных отношениях сигнал/шум 100...300 на интервал корреляции сигнала приходится на порядок меньшее число отсчётов (пикселей) [166].

В связи с недостаточно подробной дискретизацией многомерного поля облучённостей основным компонентом качества информации являются ошибки дискретизации. Эти ошибки трактуются как ошибки оценки формы сигнала, для неслучайных моделей сигнала могут трактоваться как промах системы наведения на движущуюся цель [76], [159]–[162]. Формализация качества Q формируемой информации $I(x, y)$ в выходном сигнале y о входном случайном поле x в таком варианте доминирования ошибок дискретизации соответствует минимизации среднеквадратической ошибки оценивания формы сигнала при ограничении скорости C_0 считывания видеoinформации с фотоприёмной матрицы. При этом вклад шумовой информации в потерю качества учитывается компромиссным выбором разрядности цифрового сигнала m_0 , определяемой ёмкостью пикселя N_3 в электронах [35]:

$$Q = \frac{I(x, y)}{\Delta I + I_{\text{ш}}}, \quad @ C \leq C_0, \varepsilon \gg \varepsilon_{\text{мин}} \quad Q \approx \frac{I(x, y)}{\frac{1}{2} \log \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{мин}}}}.$$

Оптимизация предполагает два этапа: определение оптимальных параметров многомерной дискретизации и ключевых правил формирования управлений, затем, исходя из дополнительного ограничения дискретности изменения параметров дискретизации и условия устойчивости системы управления параметрами ТВ камеры, определяются свойства замкнутой системы управления.

Задача на поиск минимума суммарной ошибки оценивания случайного поля достаточно просто решается при гипотезе о симметрии пространственной АКФ при $\tau_x = \tau_y$ (рис. 2.1.10) [159], [160]. При числе переменных более двух (совокупность аргументов $\{x_k, j = 1, \dots, J\}$ может быть различной, но в телевидении наиболее распространён синтез по четырём аргументам – двум пространственным x, y , длине волны λ и времени t , т. е. $E(x, y, \lambda, t)$) задача относится к *изопериметрическим* (её классический вариант – нахождение фигуры максимальной площади при ограниченном периметре), в которой в роли переменных выступают парциальные ошибки оценивания $\varepsilon_j = D_{\Delta j}$, а в роли «периметра» – доступная скорость C_0 считывания информации с фотоприёмной матрицы. В статистической теории связи примером изопериметрической задачи является нахождение распределение заданной ошибки по спектру передаваемого сигнала (эпсилон-энтропии [85], [86]). Из важного следствия максимизации качества информации, определяющего наличие *оптимального (ненулевого) скоростного смаза*, вытекают три важных вопроса:

- какие значения должны иметь оптимальные пространственные и временные интервалы накопления;
- как должны формироваться управляющие сигналы для изменения пространственной и временной чёткости;
- какими свойствами должна обладать система для обеспечения устойчивости (переход системы из одного состояния в другое не должен вести к немедленному переходу в исходное состояние).

Для решения этих задач необходимо формализовать опорную триаду статистического синтеза: априорную информацию о сюжете, критерий качества и ограничения на реализацию.

- *Априорная информация*: класс системы – смешанная (случайный непрерывный входной сигнал, цифровой выходной сигнал), освещённость фотоприёмника сюжетом считается достаточной для того, чтобы электрический сигнал занял весь доступный диапазон

амплитуд квантуемого электрического сигнала; автокорреляционные функции наблюдаемого сюжета по трём аргументам $K_x(x_1, x_2)$, $K_y(y_1, y_2)$ $K_t(t_1, t_2)$; на первом этапе оптимизации наблюдаемое поле считается стационарным, а корреляционные функции зависящими только от разности соответствующих аргументов, причём, как и в [159]–[163] будем считать, что наблюдаемое случайное поле характеризуется максимальной энтропией (его сечение по любому аргументу относится к односвязным марковским процессам), т. е. имеет экспоненциальную автокорреляционную функцию (см. раздел 2.1) с дисперсией по каждой координате $D_j = K_j(0)$ и интервалом корреляции τ_j ; априорные интервалы v_j сигнала по всем аргументам (априорный интервал дискретизации по времени для удобства определения оптимального времени кадра принимается

равным 1 с), произведение которых $V = \prod_{j=1}^J v_j$ известно. Дисперсии

ошибки дискретизации по каждому аргументу ε_j равны приращениям многомерного случайного поля $E(\{x_j\})$ на интервале дискретизации и определяются значением автокорреляционной функции при аргументе, равном интервалу дискретизации по соответствующему аргументу Δ_j . Для случайного поля с экспоненциальной автокорреляционной функцией [159]–[160] дисперсии приращений составляют:

$$\varepsilon = \sum_{j=1}^J \varepsilon_j; \quad \varepsilon_j = D_{\Delta_j} = M\{[E(x_j) - E(x_j - \Delta_j)]^2\} = \frac{2D_j \Delta_j}{\tau_j};$$

Дисперсии ошибки квантования при использовании АЦП с n разрядами при условии согласования его диапазона с ёмкостью N_s пиксела в электронах [35] составляет $\varepsilon_{\text{кв}} = \frac{1}{12} N_s^2 2^{-2n}$.

• *Ограничение:* скорость W_0 считывания информации с матрицы (пикселов в секунду, аналоговый вариант фотоприёмной матрицы) или скорость C_0 передачи цифрового сигнала, равная произведению m числа разрядов двоичного кода на предельную тактовую частоту W пикселов:

$$W = \frac{\prod_{j=1}^J v_j}{2 \prod_{j=1}^J \Delta_j} = V \prod_{j=1}^J \frac{2D_j}{\varepsilon_j \tau_j}; \quad W \leq W_0.$$

- *Критерий качества*: максимум качества информации, что при преобладании ошибок дискретизации и квантования над остальными компонентами ошибок сводится к минимуму суммы ошибок дискретизации сигнала по разным аргументам и ошибок квантования.

Вариант 1. Аналоговый фотоприёмник (или фотоприёмник с фиксированной разрядностью цифрового выхода); ограничение полосы частот W_0 . Для решения этого варианта задачи составляется уравнение Эйлера с неопределёнными множителями Лагранжа:

$$\Phi = \sum_{j=1}^J \varepsilon_j + \alpha V \prod_{j=1}^J \frac{2D_j}{\varepsilon_j \tau_j}; \quad \frac{d\Phi}{d\varepsilon_j} = 0.$$

Решение уравнения аналогично вычислению энтальпии приводит к *правилу равенства дисперсий приращений сигнала по всем аргументам*:

$$\varepsilon_j = D_{\Delta_j} = \alpha V \prod_{j=1}^J \frac{2D_j}{\varepsilon_j \tau_j} = \left[\frac{V}{W_0} \prod_{j=1}^J \frac{2D_j}{\tau_j} \right]^{\frac{1}{J}}. \quad (2.4.1)$$

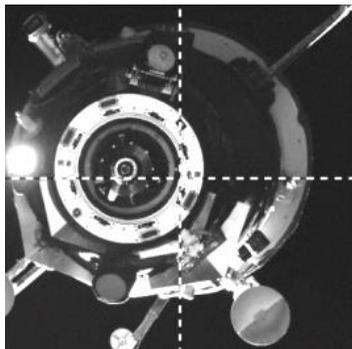
Это означает, что дисперсии приращений сигнала по всем аргументам (вне зависимости от стационарности сигнала, т. е. при постоянных и при переменных значениях его статистик) в оптимальной системе должны быть одинаковы. При этом, чем больше дисперсии поля по каждому аргументу и чем меньше соответствующие интервалы корреляции, тем больше все компоненты ошибки оценивания поля. Это правило равенства дисперсий приращений сигнала по всем аргументам реализуется с помощью адаптации интервала дискретизации к статистикам сигналов. При этом оптимальный интервал дискретизации зависит от статистик сигнала по всем аргументам, хотя и наиболее сильно от статистик сигнала по выбранному аргументу:

$$\Delta_j = \frac{\tau_j}{2D_j} \left[\frac{V}{W_0} \prod_{j=1}^J \frac{2D_j}{\tau_j} \right]^{\frac{1}{J}}.$$

Из (2.4.1) вытекает главный теоретический результат – **правило динамического выравнивания дисперсий приращений сигнала по всем аргументам** (межэлементных, межстрочных и межкадровой разностей видеосигнала):

$$D_{\Delta x} = D_{\Delta y} = D_{\Delta t}. \quad (2.4.2)$$

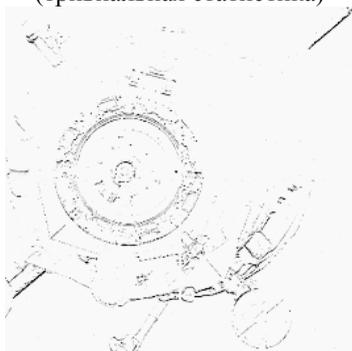
Эти статистики телевизионных сигналов иногда оказываются далёко не равны, например, при очень больших дистанциях до кооперируемого КА межкадровая разность очень мала, при очень малых – очень велика. При специальном управлении параметрами разложения они могут иметь близкие значения (рис. 2.4.1).



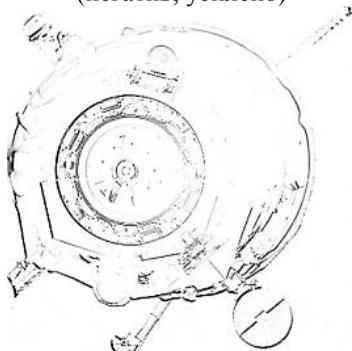
Исходный сигнал
(тривиальная статистика)



Межэлементная разность
(негатив, усилено)



Межстрочная разность
(негатив, усилено)



Межкадровая разность
(негатив, усилено)

Рис. 2.4.1. Статистики телевизионного сигнала

Вариант 2. Фотоприёмник с управляемой разрядностью цифрового выхода. Для решения этого варианта задачи также составляется уравнение Эйлера с неопределёнными множителями Лагранжа:

$$\Phi = \sum_{j=1}^J \varepsilon_j + \frac{1}{12} N_0^2 2^{-2n} + \alpha n V \prod_{k=1}^K \frac{2D_k}{\varepsilon_k \tau_k}; \quad \frac{d\Phi}{d\varepsilon_k} = 0.$$

Решение уравнения также приводит к правилу равенства дисперсий приращений случайного поля по всем аргументам, аналогичному (2.20) и (2.21):

$$\varepsilon_j = D_{\Delta_j} = \alpha n V \prod_{j=1}^J \frac{2D_j}{\varepsilon_j \tau_j} = \left[\frac{nV}{W} \prod_{j=1}^J \frac{2D_j}{\tau_j} \right]^{\frac{1}{J}}.$$

С учётом того, что в оптимальной системе $\sum_{j=1}^J \varepsilon_j = J\varepsilon_j$,

оптимальную разрядность АЦП можно найти, приравняв нулю производную от полной ошибки по числу разрядов m :

$$\frac{d \left\{ \sum_{j=1}^J \varepsilon_j + \frac{1}{12} N_3^2 2^{-2n} \right\}}{dn} = n^{\frac{1-J}{J}} \left[\frac{V}{W} \prod_{j=1}^J \frac{2D_j}{\tau_j} \right]^{\frac{1}{J}} - \frac{N_3^2}{6 \ln 2} 2^{-2n} = 0.$$

Это трансцендентное уравнение может быть решено итерационным методом. Вместе с тем в качестве первого приближения для получения наглядного результата учтём, что число K аргументов (измерений – время, пространство, длина волны) обычно имеет значения 3–4, а число разрядов АЦП обычно имеет значение 8–16.

Вследствие этого переменная величина $w = \frac{1-J}{2J} \log n$ приближённо может быть принята постоянной ($w \approx 1,2$). Обозначив постоянную

$\frac{1}{2} \log_2 \frac{N_3^2}{6 \ln 2} + w$ как максимальное значение разрядности АЦП n_0 ,

(определяемом из условия максимума качества информации при минимальной ошибке дискретизации [35]) получим значение для разрядности адаптивной системы [161], [163]:

$$n \approx n_0 - \frac{1}{2} \log_2 \left[\frac{V}{W} \prod_{j=1}^J \frac{2D_j}{\tau_j} \right]^{\frac{1}{J}} = n_0 - \frac{1}{2} \log_2 \left[\frac{V}{W} \prod_{j=1}^J \frac{D_{\Delta_j}}{\Delta_j} \right]^{\frac{1}{J}}. \quad (2.4.3)$$

Этот результат означает, что адаптация оптимальной системы, которая в силу того, что она основана на решении изопериметрической задачи, может быть названа **изодинамической** (динамически сбалансированной), и включает не только взаимообмен разрешающей способности по разным аргументам, но и адаптацию разрядности АЦП. При этом, если скорость изменения сигнала по всем аргументам достаточно мала (не превышает определённого порога), то разрядность АЦП принимает значение n_0 , если рост совокупности дисперсий приращений сигнала D_{Δ_j} уже не удаётся парировать изменениями интервалов дискретизации Δ_k , то следует в

рамках доступной скорости передачи $C \leq nW$ идти на уменьшение разрядности АЦП для расширения полосы частот W для уменьшения общей ошибки оценивания сигнала [161], [163], [248].

Задачу сопровождения объектов рассмотрим на примере контроля сближения и стыковки космических аппаратов (см. раздел 3.2). Для обеспечения стыковки КА главным является первый контур управления, реализующий метод сближения КА. Важным принципом измерения координат объекта наведения, особенно на дальних дистанциях (когда требуется отслеживать координаты существенно малоразмерного объекта в ТВ кадре), является принцип следящего измерения, на базе которого строятся следящие телевизионные координаторы объектов, реализующие второй внутренний замкнутый контур системы автоматического управления (рис. 2.4.2).

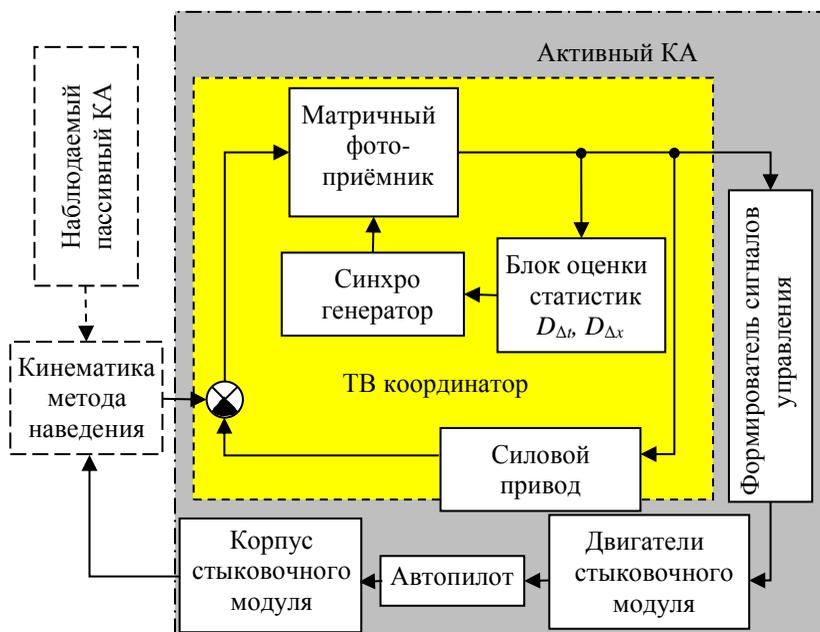


Рис. 2.4.2. Система наведения стыковочного модуля с тремя контурами оценки параметров

Если ТВ камеры контроля сближения КА на матричных фотоприёмниках жёстко связаны с корпусом стыковочного модуля, то силовой привод координатора, реализующий второй внутренний следящий контур, может отсутствовать. Новым элементом такой следящей системы является третий контур слежения за

статистиками сигнала изображения, управляющий чёткостью и кадровой частотой фотоприёмника. Такая следящая система реализует ещё один вариант **введённого С. П. Королевым принципа итерационного сближения КА**: при изменении дистанции между КА меняются параметры измерительных телевизионных систем. Адаптация чёткости и кадровой частоты дополняет широко применяемый метод изменения угла зрения ТВ камеры при изменении дистанции между кооперируемыми КА (см. разделы 1.2 и 3.4).

Для достижения устойчивости в третьем контуре слежения за статистиками телевизионного изображения следует учитывать следующее [160]–[162]:

- управление чёткостью (размерами элемента накопления) можно осуществлять *только дискретно (бинированием)*, с переходом из одного состояния A^i к другому, отличающемуся по площади накопления эффективного пиксела: 1×1 , 2×2 , 3×3 , 4×4 исходных пикселов и т. д.;

- для состояния A^i достижимы различные кадровые частоты, пропорциональные числу складываемых элементов по одной из осей: $F_{к1}$, $F_{к2} = 2F_{к1}$, $F_{к3} = 3F_{к1}$, $F_{к4} = 4F_{к1}$ и т. д.;

- дисперсии межэлементной $D_{\Delta x}$ и межкадровой $D_{\Delta t}$ разностей формируются (рассчитываются) в дискретные моменты времени;

- для уменьшения влияния шумовых составляющих сигнала следует вводить инерционность и нелинейность.

Дискретность перехода от одного состояния к другому иллюстрируется тем, что при одном и том же сюжете с постоянной скоростью сближения КА бинирование увеличивает дисперсию межэлементной разности и в силу соответствующего двукратного увеличения кадровой частоты уменьшает дисперсию межэлементной разности (рис. 2.4.3 иллюстрирует изменения статистик изображения рис. 2.4.1).

При переходе из одного состояния в другое возможны различные варианты стабилизации уровня сигнала, формируемого ТВ камерой. Например, когда при принятии решения о необходимости повышения кадровой частоты пикселы группируются по 4 («бининг» вида 2×2) и накопленный за кадр видеосигнал возрастает в 4 раза, а кадровая частота возрастает вдвое, поэтому накопленный за кадр видеосигнал уменьшается в 2 раза и для обеспечения устойчивости системы необходимо дополнительное двукратное сокращение времени накопления.

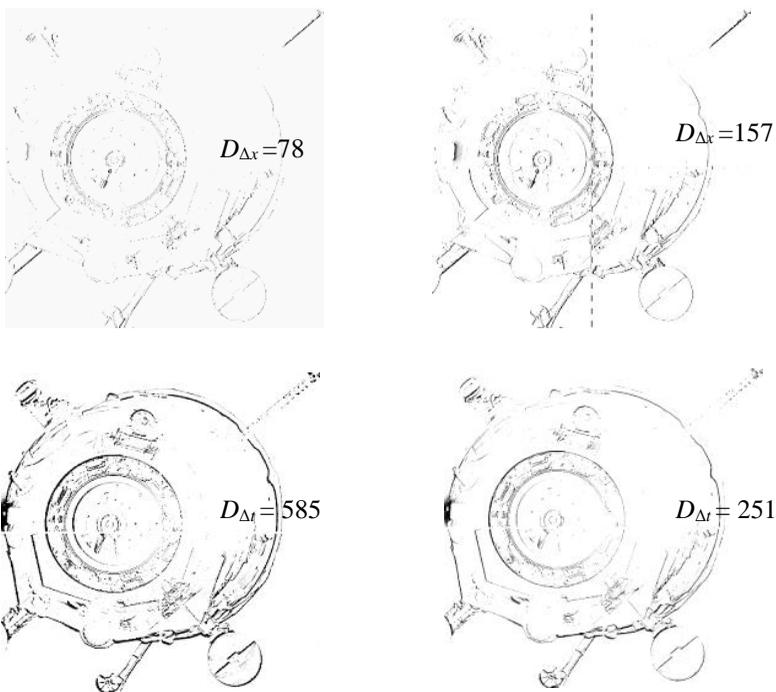


Рис. 2.4.3. Взаимообмен чёткости и кадровой частоты: исходная чёткость (слева) и при бинировании (справа); межэлементная разность (сверху) и межкадровая разность (снизу)

Правило (2.4.2) динамического выравнивания дисперсий межэлементных и межкадровой разностей видеосигнала в совокупности с указанными условиями диктует построение системы управления с использованием формирователя отношения внутрикадровых и межкадровых статистик (дисперсий первых конечных разностей), которое далее будем называть опорной статистикой $z_k = D_{\Delta x k} / D_{\Delta t k}$ с дискретным временем kT_k . Она изменяется во времени (например, в ходе сближения кооперируемых КА) и представляет собой аддитивную смесь математического ожидания $\varphi(k) = \varphi(kT_k)$ и помехи $\xi(k) = \xi(kT_k)$, по которой строится оценка $\hat{\varphi}(kT) = \hat{\varphi}(k)$.

Необходимыми элементами третьего контура управления являются устройство фильтрации во времени этой статистики z для минимизации суммы динамических и флуктуационных ошибок и схема нелинейного управления, представляющая собой многоуровневое пороговое устройство со множеством порогов γ_i и гистерезисной характеристикой, преобразующей непрерывную величину

(отфильтрованную статистику \hat{z}_k) в дискретное множество состояний адаптивной системы (рис. 2.4.4).



Рис. 2.4.4. Структура системы с адаптивным управлением

Применение теории систем с гистерезисом [167], [168] к системе адаптивного взаимобмена чёткости и кадровой частоты позволяет формализовать работу контура управления на основе переходов из различных состояний A^i к соседним состояниям [161], рис. 2.4.5.

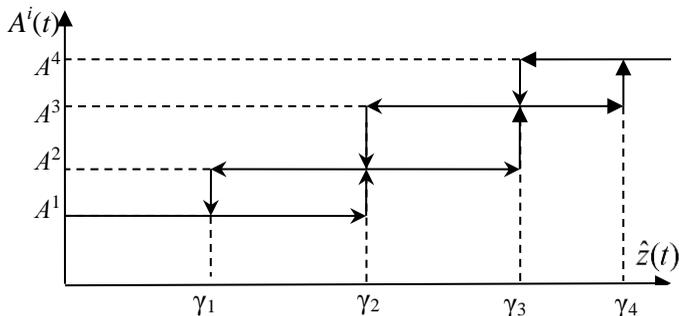


Рис. 2.4.5. Нелинейность в управлении адаптивной системой

Не останавливаясь на системе с широким набором комбинаций чёткости и кадровой частоты, рассмотрим простейший случай, выявляющий основную специфику дискретной системы управления, когда система может иметь два состояния, изменяющиеся во времени и имеющие индекс номера кадра k :

A_k^1 – высокая чёткость, низкая кадровая частота,

A_k^2 – низкая чёткость, высокая кадровая частота.

В упрощённой модели с двумя состояниями опорная статистика $z_k = D_{\Delta x k} / D_{\Delta t k}$ сравнивается с двумя порогами – верхним γ_v и

нижним γ_n . Минимальное отношение порогов $d = \gamma_v/\gamma_n$ соответствует изменению отношений интервалов пространственной (по одной из переменных – по вертикали или по горизонтали раstra) и временной дискретизации, что в рассматриваемом случае составляет 4. Так, в эксперименте рис. 2.4.3 опорная статистика для полной чёткости составляет 0,133, для бинированного сигнала с удвоенной кадровой частотой – 0,62, то есть при переключении состояний опорная статистика изменилась в 4,7 раза; анализ отношения межстрочных и межкадровых разностей дал значение 4,9 раза. Превышение этих значений над минимальным значением 4 подробно исследуется ниже.

Для этой задачи концепция адаптации проста: пока КА находится на большой дистанции, следует использовать максимальную чёткость (состояние A^1); когда расстояние до него мало, следует использовать максимальную кадровую частоту (состояние A^2). Правило формирования управляющих сигналов, формируемых системой управления и передаваемых на синхрогенератор ТВ камеры для переходов из состояний A_k^1 в A_k^2 и обратно, определяется расположением опорной статистики z (или её оценки \hat{z}) относительно порогов принятия решения:

$z > \gamma_v \rightarrow C_k = +1$; переход в состояние A_k^1 ;

$z < \gamma_n \rightarrow C_k = -1$; переход в состояние A_k^2 ;

$\gamma_n \leq z \leq \gamma_v \rightarrow C_k = 0$; сохранение имеющегося состояния A^i .

При этом возможны различные ситуации G_j (рис. 2.4.6):

G_1 : $C_k = +1$, A_{k-1}^2 , система переводится в состояние A^1 ;

G_2 : $C_k = +1$, A_{k-1}^1 , система вынужденно сохраняет своё состояние, так как нет запаса повышения чёткости;

G_3 : $C_k = -1$, A_{k-1}^1 – система переводится в состояние A^2 ;

G_4 : $C_k = -1$, A_{k-1}^2 – система вынужденно сохраняет своё состояние, так как нет запаса повышения кадровой частоты;

G_5 : $C_k = 0$, A_{k-1}^1 или A_{k-1}^2 система сохраняет своё состояние.

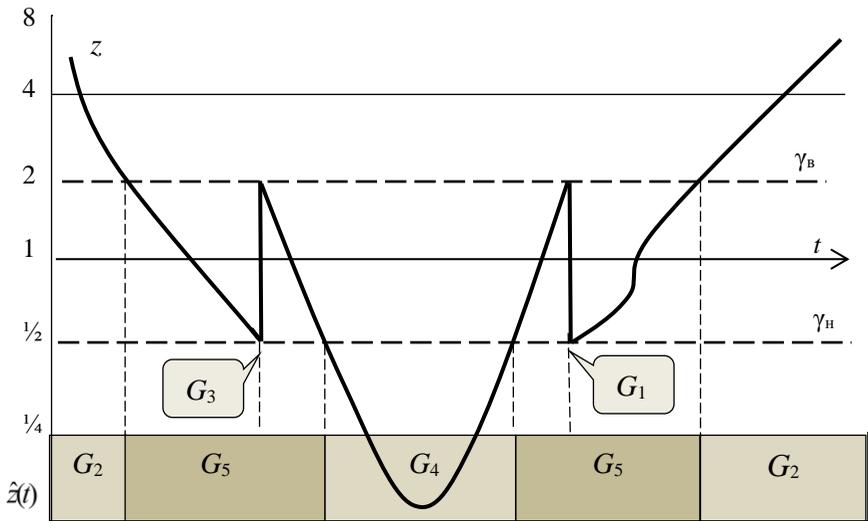


Рис. 2.4.6. Изменение состояний адаптивной телевизионной системы при изменении опорной статистики z во времени

Вместе с тем для обеспечения устойчивости адаптивной системы опоры на отношение порогов $d = \gamma_B / \gamma_H = 4$, обусловленное дискретностью раstra, из-за неизбежного наличия в видеосигнале шумов, не достаточно. Можно было бы произвольно ввести некоторый запас и увеличить отношение порогов принятия решения, но так как в задачу системы наблюдения входит минимизация времени, при котором система находится в состояниях с опорной статистикой $z_k \gg 1$ или $z_k \ll 1$, то необходим статистический синтез системы, основанный на нахождении оптимальных значений порогов принятия решений о переводе системы в иное состояние. Для такого синтеза необходимы экспериментальные оценки скорости изменения во времени математического ожидания $\phi(k)$ опорной статистики z_k и свойств помехи $\xi(k)$.

Многообразие практических задач велико, и здесь рассмотрим лишь один пример, характеризуемый монотонным изменением характеристик сигнала. В качестве примера выберем систему контроля сближения и стыковки КА, в которой дальность до контролируемого КА и масштаб изображения монотонно изменяются от малого размера до размера всего кадра. Результаты измерения статистик приведены на рис. 2.4.7.–2.4.10.

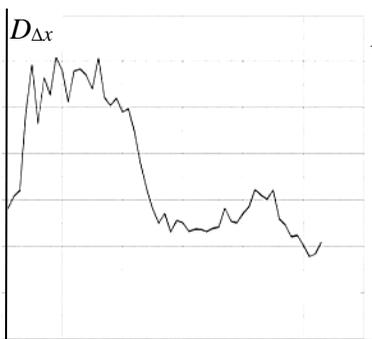


Рис. 2.4.7. Изменение дисперсии межэлементной разности в ходе сближения КА

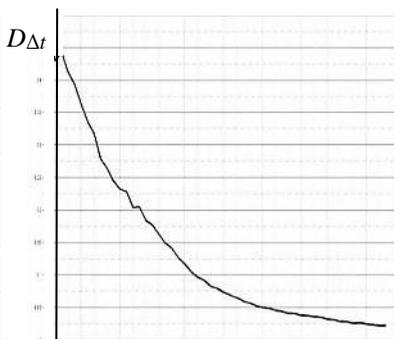


Рис. 2.4.8. Изменение дисперсии межкадровой разности в ходе сближения КА

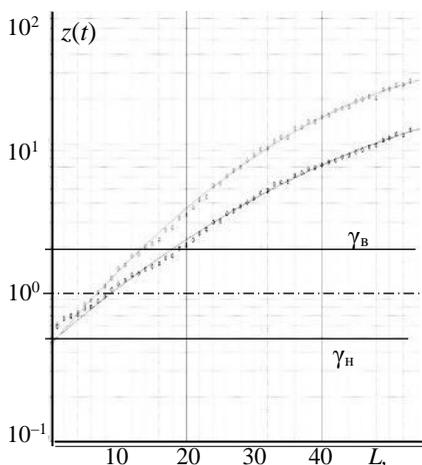


Рис. 2.4.9. Изменение статистики z_k

в ходе сближения КА; точки – эксперимент, кривые – аппроксимация $\varphi(k)$; внизу – полное разрешение, вверху – бининг 2×2

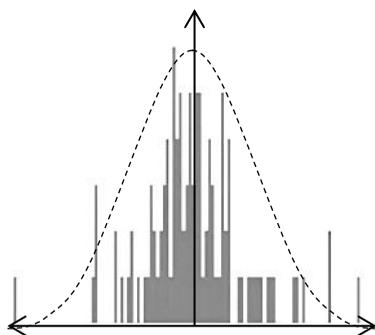


Рис. 2.4.10. Гистограмма распределения помехи $\xi(k)$ и аппроксимация её функции плотности вероятности (пунктир)

Измерения показывают, что монотонное уменьшение дальности порождает монотонное уменьшение опорной статистики z . Вместе с тем выявленные флуктуации статистики (рис. 2.4.10), приводят к тому, что измеренное отношение значений опорной статистики для рис. 2.4.3 превысило минимальное значение 4. Это требует оценки необходимого увеличения отношения порогов $d = \gamma_{\text{в}}/\gamma_{\text{н}}$, обеспечивающего устойчивость системы.

Будем считать, что наблюдаемый сигнал можно моделировать случайным процессом x с нормальным распределением, включающим сигнальную компоненту с нулевым математическим ожиданием и переменной дисперсией и шумовую компоненту с нулевым математическим ожиданием, дисперсией σ^2 и с нулевой взаимной корреляцией с полезным сигналом и с нулевой автокорреляцией при произвольном ненулевом сдвиге. Устойчивость полученных результатов к изменению вида функции распределения сигнала нуждается в дополнительном, в первую очередь экспериментальном, исследовании. В качестве предварительного замечания отметим, что при постоянстве дисперсии и интервала корреляции изменение функции распределения ведёт к изменению формы сигнала первой конечной разности без изменения её дисперсии.

Из генеральной совокупности производятся выборки x_i , ($i = 1, \dots, N$) по N пикселей, составляющие отдельные кадры видеопоследовательности. Полученные выборки обрабатываются вычислителем, входящим в состав системы автоматического управления и формирующим в каждом k -м кадре статистики, соответствующие дисперсиям межэлементной и межкадровой разностей:

$$D_{\Delta x k} = \sum_{i=1}^N (x_{ki} - x_{k(i-1)})^2, \quad D_{\Delta t k} = \sum_{i=1}^N (x_{ik} - x_{i(k-1)})^2.$$

Статистика $x_{ki} - x_{k(i-1)}$ принадлежит к нормальному распределению $x \in N(0, 2\sigma^2 + \sigma_1^2)$, где σ_1^2 – текущее значение дисперсии межэлементной разности отсчётов сигнала (дисперсия шума при формировании разности отсчётов удваивается, а дисперсия первой конечной разности определяется тремя параметрами: дисперсией полезного сигнала, его интервалом корреляции и интервалом дискретизации по соответствующему аргументу [33]–[36]). Аналогично статистика $x_{ik} - x_{i(k-1)}$ принадлежит к нормальному распределению $x \in N(0, 2\sigma^2 + \sigma_2^2)$, где σ_2^2 – значение дисперсии межкадровой разности отсчётов сигнала.

Статистика $D_{\Delta x k}$ принадлежит к распределению хи-квадрат $D_{\Delta x k} \in \chi^2$ с параметром $2\sigma^2 + \sigma_1^2$ и $N - 1$ степенями свободы. Плотность распределения этой статистики выражается с учётом гамма-функции $\Gamma\{\}$ от числа степеней свободы [162]:

$$p(v) = \frac{v^{(N-1)/2-1}}{[2(2\sigma^2 + \sigma_1^2)]^{(N-1)/2} \Gamma\{(N-1)/2\}} \exp\{-v/[2(2\sigma^2 + \sigma_1^2)]\}. \quad (2.4.4)$$

Аналогично статистика $D_{\Delta k}$ так же имеет распределение хи-квадрат, но с другим параметром $2\sigma^2 + \sigma_2^2$.

Система управления вычисляет опорную статистику z , являющуюся модифицированной статистикой Фишера–Снедекора с центральным распределением и N степенями свободы, имеющей плотность вероятности следующего вида [162]:

$$p(z) = (1/\varphi) \frac{\Gamma\{N-1\}}{\Gamma\{(N-1)/2\}\Gamma\{(N-1)/2\}} \left(\frac{(z/\varphi)^{(N-1)/2-1}}{(1+(z/\varphi))^{(N-1)}} \right),$$

где $\varphi = M\{z\} = (2\sigma^2 + \sigma_1^2) / (2\sigma^2 + \sigma_2^2)$ – отношение дисперсий.

Это распределение при малых объёмах выборки имеет несимметричный вид, при достаточно больших объёмах выборки (соответствующих числу элементов в фотоприёмной матрице, которое обычно имеет порядок $10^5 \dots 10^7$) становится симметричным, что использовано при аппроксимации функции плотности вероятности помехи $\xi(k)$, аддитивной с математическим ожиданием $\varphi(t)$ на рис. 2.4.10. Не останавливаясь на известных результатах, соответствующих равенству математических ожиданий статистик $D_{\Delta x k}$ и $D_{\Delta t k}$ ($\varphi = 1$), рассмотрим характеристики этого распределения при значении отношения этих математических ожиданий $\varphi = 2$, соответствующем минимальному значению верхнего порога принятия решения (решение для значения $\varphi = 1/2$ симметрично, рис. 2.4.11). Требуется найти порог $\gamma_{в0}$, для которого при $\varphi = 2$ вероятность $p_{лт}$ превышения порога $\gamma_{в0}$ менее заданного значения P_0 :

$$p_{лт} = \int_{\gamma_{в}}^{\infty} p(z) dz \leq P_0; \quad p_{лт} = \int_{-\infty}^{\gamma_{н}} p(z) dz \leq P_0. \quad (2.4.5)$$

При сравнительно небольших порогах, обеспечивающих приемлемую вероятность ложной тревоги, и достаточно больших значениях числа пикселей N можно преобразовать формулу (2.4.5) после подстановки в неё (2.4.4) к простому виду:

$$\gamma_{в} \approx \varphi \left(1 + \frac{1}{p_{лт} \sqrt{\pi N}} \right).$$

Пример расчёта оптимальных порогов $\gamma_{в0}$ (нижний порог $\gamma_{н0}$ имеет обратное значение: $\gamma_{в0} \times \gamma_{н0} = 1$) приведём для типовых значений отношения сигнал/шум порядка 100 и типовых интервалов корреляции изображений по полю и по времени (раздел 2.1, [112]) (рис. 2.4.12).

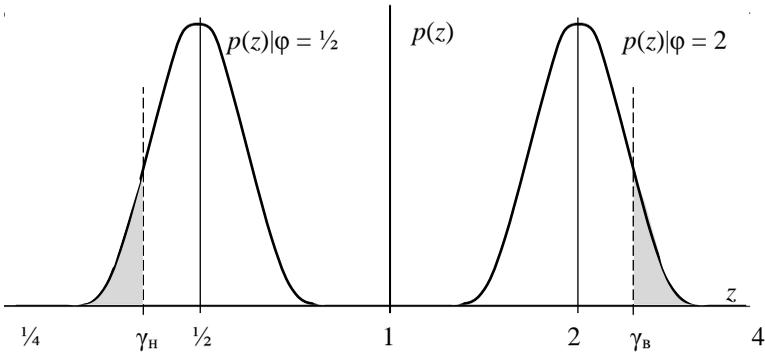


Рис. 2.4.11. Вид функции распределения опорной статистики z при двух значениях её математического ожидания $\varphi = 2$ и $\varphi = 1/2$

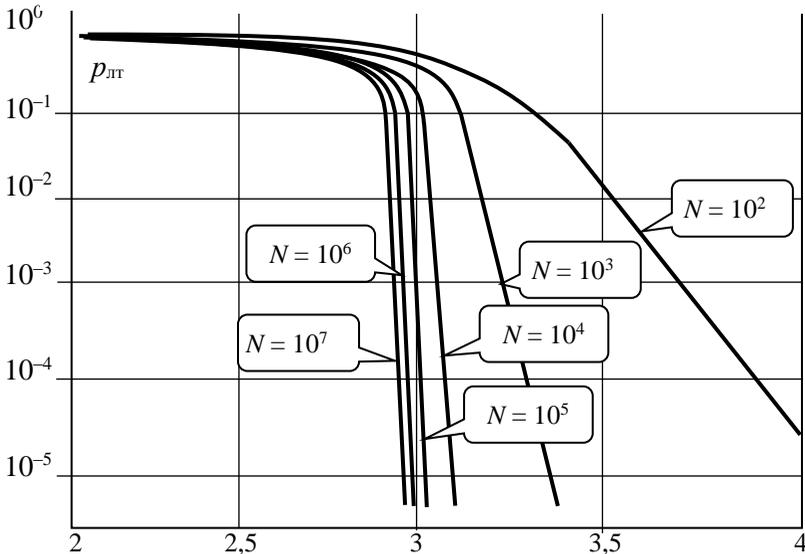


Рис. 2.4.12. Зависимость вероятности превышения порога $\gamma_{\text{в}}$ статистикой z при $\varphi = 2$ для выборок объёмом $N = 10^2 \dots 10^7$

Результаты расчёта (рис. 2.4.12) показывают, что при анализе отдельного значения статистики z без формирования её усреднённой по времени оценки её математического ожидания $\hat{\varphi}(k)$:

- при разумных значениях вероятности ложной тревоги (преждевременного изменения состояния системы, чреватого обратным изменением в следующем кадре) пороги существенно отличаются от минимальных, диктуемых дискретностью раstra и отношение порогов $d = \gamma_{\text{в}}/\gamma_{\text{н}}$, в отсутствие флуктуаций равное 4, должно быть увеличено примерно до 9;

- вероятность принятия правильного решения повышается с увеличением математического ожидания опорной статистики z_k , а степень этого повышения резко увеличивается с увеличением числа степеней свободы распределения (числа пикселей матрицы);
- защитный интервал (отличие порога γ_v от математического ожидания $\varphi = 2$) с уменьшением вероятности ложной тревоги увеличивается, а при увеличении степеней свободы распределения (числа выборок) его значение уменьшается;
- при математическом ожидании опорной статистики, равном двум ($\varphi = 2$), и объёмах выборки $N > 10^4$ повышение порога принятия решения до 3 приводит к резкому снижению вероятности ложной тревоги до пренебрежимо малых значений.

В реальных системах скорость изменения математического ожидания $\varphi(k)$ опорной статистики z невелика (рис. 2.4.9), а отклонения статистики z_k от среднего значения $\varphi(k)$ в соседних кадрах статистически независимы, в силу чего возникает возможность минимизации времени нахождения системы в «неправильном» состоянии (когда дисперсии приращений сигналов по различным аргументам существенно отличаются друг от друга), или, для анализируемого простейшего варианта системы с двумя состояниями – возможность увеличения времени нахождения системы в состоянии $\frac{1}{2} < z < 2$. Эта задача относится к проблематике оптимальной фильтрации (в общем случае нелинейной), в ходе которой формируются оценки $\hat{\varphi}(k)$ текущего значения z_k с учётом производной математического ожидания $\varphi(k)$ статистики z_k по времени $d\varphi(k)/dt$. Функцию $\varphi(k)$ можно моделировать кусочно-линейной зависимостью (в реальных условиях стыковки КА работают корректирующие двигатели, вносящие аддитивные скачки в закон изменения $\varphi(k)$). Учитывая в среднем монотонный вид функции $\varphi(k)$, можно получать её оценку с использованием оптимального фильтра Калмана, вводящего переменную во времени инерционность в процесс оценивания. Этот вариант задачи нахождения оптимальной инерционности системы управления методологически родственен нахождению оптимальной инерционности линейного фильтра в теории фильтрации Колмогорова–Винера. Это видно из того, что, как и при линейной фильтрации, возникает два противоположных эффекта: введение инерционности уменьшает шумовую ошибку, но увеличивает задержку (аналог линейной ошибки).

Тогда, учитывая дискретную форму формирования измерений $\varphi(k)$, где $k = 0, 1, 2 \dots$ (k соответствует моментам времени t_k), вектор состояния запишем в виде $\Phi(k) = [\varphi(k) \ \dot{\varphi}(k)]^T$. Тогда алгоритм формирования параметров вектора оценок $\hat{\varphi}(k)$ будет иметь вид [169]:

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}(k) &= \Phi(k)\hat{\varphi}(k-1) + \mathbf{K}(k)\Delta\varphi(k), \hat{\varphi}(0) = \hat{\varphi}_0, \\ \Delta\varphi(k) &= \varphi(k) - \mathbf{C}\Phi(k)\varphi(k-1), \end{aligned} \quad (2.4.6.)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{P}_3(k) &= \Phi(k)\mathbf{P}(k)\Phi^T(k), \mathbf{P}(0) = \mathbf{P}_0; \\ \mathbf{K}(k) &= \mathbf{P}_3(k)\mathbf{C}^T[\mathbf{C}\mathbf{P}_3(k)\mathbf{C}^T + R(k)]^{-1}; \\ \mathbf{P}(k) &= \mathbf{P}_3(k) - \mathbf{K}(k)\mathbf{C}\mathbf{P}_3(k). \end{aligned} \right\}, \quad (2.4.7)$$

где $\Phi(k)$ – 2×1 матрица экстраполяции; $\mathbf{K}(k)$ весовая матрица; $\Delta\varphi(k)$ – невязка (разность между наблюдаем значением $z(k)$ и экстраполированной на момент k оценкой $\hat{\varphi}(t)$); $\mathbf{P}_3(k)$ и $\mathbf{P}(k)$ – 2×2 ковариационные матрицы ошибок экстраполяции и оценивания, соответственно; $\mathbf{C} = [1 \ 0]$ – 1×2 матрица-строка наблюдения, показывающая, что из всего вектора состояния непосредственно измеряется только одна величина $\varphi(t)$; $R(k)$ – ковариационная матрица ошибок измерений, которая при указанной выше матрице наблюдения \mathbf{C} представляется скаляром. Здесь $m = 2$ – размерность оцениваемых параметров вектора состояния $\Phi(k)$ (в данном случае $\varphi(t)$ и её производной – $\dot{\varphi}(k)$), «т» – символ транспонирования. Определяемые в соответствии с выражением (2.4.7) значения элементов весовой матрицы $\mathbf{K}(k)$ следует ограничивать снизу на заданном уровне для борьбы с динамическими ошибками оценивания [170].

Учитывая, что ковариационная матрица $\mathbf{P}_{\Delta\varphi}$ невязки $\Delta\varphi(k)$ определяется выражением $\mathbf{P}_{\Delta\varphi}(k) = \mathbf{C}\mathbf{P}_3(k)\mathbf{C}^T + R(k)$ [171], можно получить выражение для ковариационной матрицы произведения $\mathbf{K}(k)\Delta\varphi$ в виде

$$\mathbf{P}_{\mathbf{K}\Delta\varphi} = \mathbf{K}(k)[\mathbf{C}\mathbf{P}_3(k)\mathbf{C}^T + R(k)] \mathbf{K}^T(k). \quad (2.4.8)$$

Подставляя в (2.3.8) выражение для $\mathbf{K}(k)$ из (2.4.7), обозначая символом $M\{\dots\}$ математическое ожидание, а также учитывая свойство симметричности ковариационных матриц $\mathbf{P}_{\Delta\varphi}(k)$ и $\mathbf{P}_3(k)$, получим [171]:

$$M\{[\mathbf{K}(k)\Delta\varphi(k)][\mathbf{K}(k)\Delta\varphi(k)]^T\} = \mathbf{K}(k)\mathbf{C}\mathbf{P}_3(k) = \mathbf{P}_3(k) - \mathbf{P}(k).$$

Полагая шумы измерения и систему слежения стационарными, для установившегося режима работы получим:

$$\mathbf{P}_3(k) \approx \mathbf{P}_3(k+1), \quad \mathbf{P}(k) \approx \mathbf{P}(k-1), \quad \mathbf{K}(k) \approx \mathbf{K}(k-1).$$

Откуда следует:

$$\mathbf{P}_3(k+1) = \mathbf{K}(k)M [(\Delta\varphi(k))^2]\mathbf{K}^T(k) + \mathbf{P}(k) = \overline{\mathbf{K}(k) \mathbf{K}^T(k) (\Delta\varphi(n))^2} + \mathbf{P}(n).$$

Тогда весовую матрицу $\mathbf{K}(k)$ можно определять в соответствии с рекуррентными выражениями [1171]:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{K}(k) &= \mathbf{P}_3(k)\mathbf{C}^T[\mathbf{C}\mathbf{P}_3(k)\mathbf{C}^T + R(k)]^{-1}, \mathbf{P}_3(1) = \mathbf{P}_1; \\ \mathbf{P}(k) &= \mathbf{P}_3(k) - \mathbf{K}(k)\mathbf{C}\mathbf{P}_3(k); \\ \mathbf{P}_3(k+1) &= \mathbf{K}(k)\mathbf{K}^T(k)(\Delta\varphi(k))^2 + \mathbf{P}(k). \end{aligned} \right\} \quad (2.4.9)$$

Среднеквадратичное значение невязки $(\Delta\varphi(k))^2$ следует определять статистически за несколько кадров. Алгоритм оценивания параметров вектора $\varphi(k)$ по выражениям (2.4.6) и (2.4.9) определяет структуру и параметры третьего контура управления (параметрами разложения фотоприемной матрицы) в схеме на рис. 2.4.2. Реализуемая этими алгоритмами рекуррентная процедура описывает линейный фильтр сглаживания флуктуаций с характерной для фильтрации односвязных марковских процессов экспоненциально убывающей импульсной характеристикой, эффективная длительность τ_ϕ которой адаптивна к свойствам фильтруемого сигнала. Фильтр, описываемый выражениям (2.4.6) и (2.4.9) позволяет системе минимизировать ошибки оценивания статистики $\varphi(k)$ как на её линейных участках, так и при скачкообразных изменениях, реагируя на любые изменения входной величины $\varphi(k)$, посредством изменения значений составляющих весовой матрицы $\mathbf{K}(k)$.

Упрощённый вариант такой фильтрации может быть реализован с помощью нелинейного накопления, т. е. с помощью принятия решения после превышения опорной статистикой z_k уменьшенного порога подряд в m кадрах. Это позволяет понизить порог γ_v от максимального значения γ_{v1} до значения $\gamma_m(m)$. В результате отношение порогов $d = \gamma_v/\gamma_{v1}$, в отсутствие флуктуаций ($m \rightarrow \infty$) равное $d_\infty = 4$, должно быть увеличено не до $d_1 = 9$, а до меньшего значения d_m . В этом простом случае существует оптимальное число m совместно анализируемых последовательных кадров (в силу чего возникает задержка на m кадров), зависящее от текущего значения производной математического ожидания φ статистики z_k по времени $d\varphi(k)/dt$ (см. рис. 2.4.9). Поэтому для минимизации времени k_m нахождения системы в «неправильном» состоянии следует найти экстремум функционала (рис. 2.4.13):

$$k_m = m + \frac{\gamma_m - \gamma_\infty}{d\varphi(k)/dt} \rightarrow \min. \quad (2.4.10)$$

Аналитическое решение задачи (2.4.10) возможно при явной

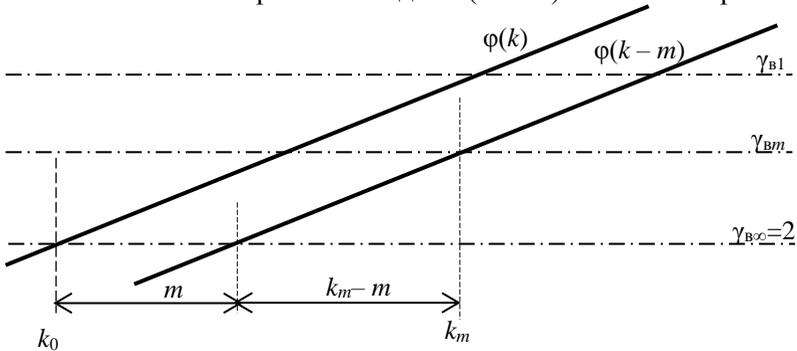


Рис. 2.4.13. Определение оптимального интервала m усреднения статистики z_k с учётом скорости изменения её математического ожидания $d\varphi(k)/dt = (\gamma_{Bm} - \gamma_{B\infty})/(k_m - m)$

формализации зависимости порога $\gamma_m(m)$, которая получается подстановкой функции распределения (2.4.4) в выражение для ложной тревоги (2.4.5). В аналитических функциях эта зависимость не выражается, и для оценок искомого значения оптимального числа кадров можно воспользоваться аппроксимацией функции $\gamma_m(m)$. Численный анализ показал, что хорошей аппроксимацией этой зависимости является функция $\gamma_m(m) \approx \gamma_\infty + m^{-1/4}$. Тогда, взяв производную dt_m/dm и приравняв её нулю, найдём оптимальное значение числа m кадров, за которые следует перемножать решения о превышении статистикой z_k порога γ_m :

$$m_0 \approx [4d\varphi(k)/dt]^{-4/5}. \quad (2.4.11)$$

Значение оптимального числа кадров при такой нелинейной фильтрации имеет порядок эффективной длительности τ_ϕ оптимального линейного фильтра (2.4.6), (2.4.9). Расчёт по (2.4.11) показывает, что при $d\varphi(k)/dt > 10^{-1}$ оптимальная инерционность составляет всего 2 кадра, а при характерной для средних дистанций наблюдения в задаче контроля стыковки КА $d\varphi(k)/dt = 10^{-2} \dots 10^{-3}$ достигает двух–трёх десятков кадров. Для этих значений отношение d порогов принятия решения о переключении параметров разложения, хотя не достигает предельного значения $d_\infty = 4$, но составляет уже не $d_1 = 9$, как при отсутствии инерционности, а $d_m \approx 5,5 \dots 5,8$.

Эффективность метода адаптации накопления с взаимобменом чёткости и кадровой частоты может быть проиллюстрирована экспериментом с наблюдением подвижных объектов, изображения которых перемещаются по фотоприёмнику с переменной скоростью (рис. 2.4.14).

ТВ камера на матричном КМОП фотоприёмнике позволяла с помощью «бининга» реализовать три сочетания чёткости и кадровой частоты: 5 Мегапикселей при кадровой частоте 7 Гц, 1,25 Мегапикселя при кадровой частоте 16 Гц и 0,3 Мегапикселя при кадровой частоте 22 Гц [160].

При реализации рассмотренной изодинамической телевизионной системы при переходе к состоянию с бинированием необходима интерполяция изображения (в простейшем случае – повтор сигнала каждого пиксела на соседний по строке и на пару пикселей в следующей строке). При отображении на мониторе «пиксел в пиксел», т. е. без необходимой интерполяции, бинирование сигнала при том же угле поля зрения ТВ камеры ведёт к уменьшению масштаба изображения (рис. 2.4.14).

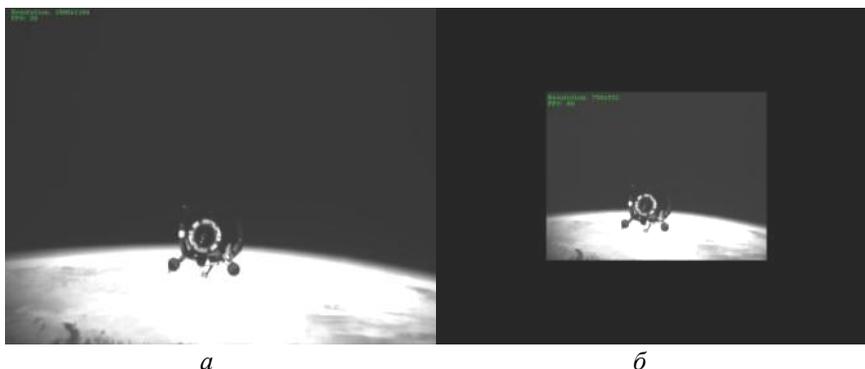


Рис. 2.4.14. Изменение масштаба изображения при отображении «пиксел в пиксел» при разрешении 1500×1104 – *а*; 750×552 (бинировании) – *б*

Эксперимент (рис. 2.4.15– 2.4.17) подтвердил существование оптимального сочетания чёткости и кадровой частоты, обеспечивающего максимум качества информации и зависящего от скорости изменения сюжета во времени [160]. Измерения разрешающей способности по подвижной тест-таблице (рис. 2.4.15) подтвердили наличие максимума качества изображения, достигаемого при разных параметрах накопления, определяемых скоростью движения.

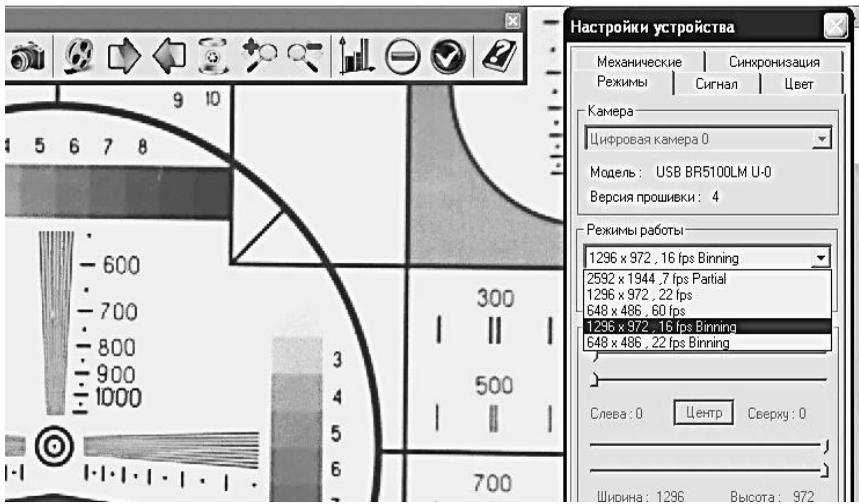


Рис. 2.4.15. Фрагмент изображения: движущая тест-таблица и панель управления параметрами разложения

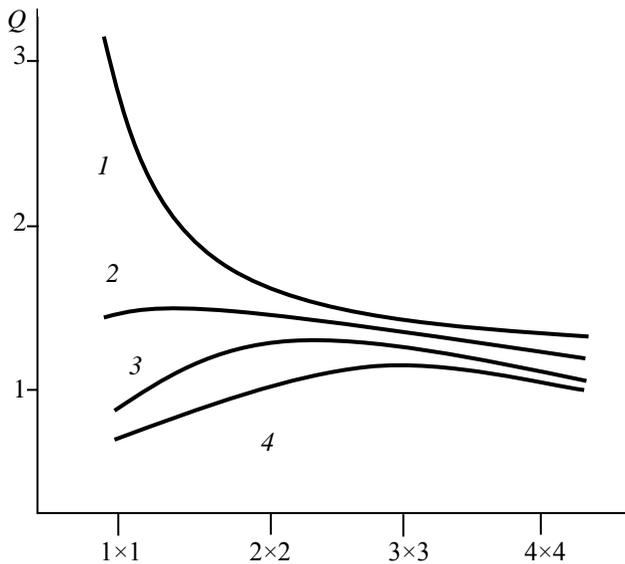


Рис. 2.4.16. Зависимость качества информации от степени бинирования при различной скорости движения объекта, первичных пикселей/с:

$$v = 0 - 1; v = 25 - 2; v = 50 - 3; v = 100 - 4$$

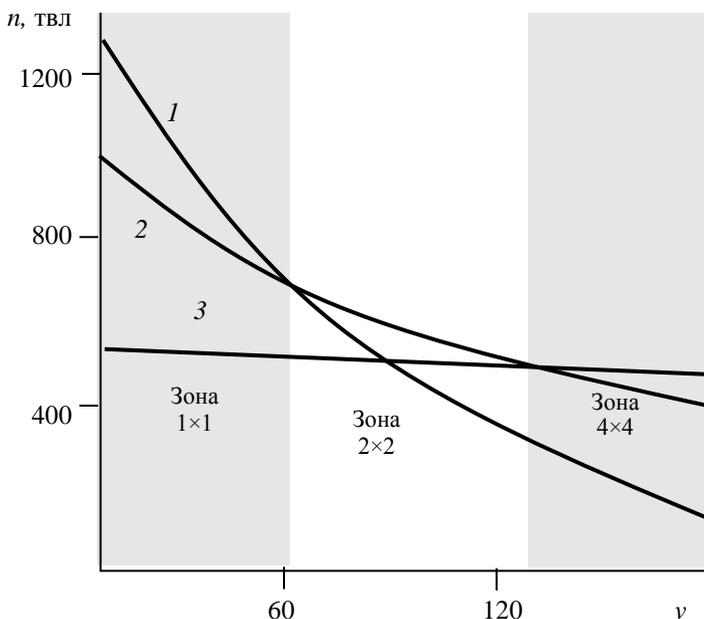


Рис. 2.4.17. Зависимость разрешающей способности n , ТВЛ, от скорости движения таблицы v , первичных пикселей/с, при полной чёткости – 1; бинировании 2×2 – 2; бинировании 4×4 – 3

Таким образом, предложенный подход к адаптивному взаимнообмену кадровой частотой, чёткости и разрядности сигнала изображения позволяет достичь условного максимума качества видеoinформации путём решения изопериметрической задачи (при выбранном твердотельном фотоприёмнике и ограничении скорости считывания информации с него) с учётом изменяющихся во времени статистик наблюдаемого сюжета, например, при изменении дальности до наблюдаемого КА. Синтезированная изодинамическая адаптивная система опирается на правило равенства дисперсий приращений сигнала по всем аргументам; в ней уравновешено влияние ошибок, вызванных пространственной и временной дискретизацией, шумом и квантованием. Эти результаты отражают влияние твердотельной технологии на изменение методов системного проектирования в космическом телевидении.

2.5. Кодирование канала

При рождении и на начальном этапе развития космического телевидения кодирование канала сводилось к использованию аналоговых каналов с амплитудной или частотной модуляцией и во многом опиралось на стандарты аналогового вещательного телевидения (см. гл. 1). Однако стремление к повышению качества информации (информационному равновесию, т. е. равенству энтропии источника и пропускной способности канала связи, см. раздел 2.1) породило переход к цифровым методам кодирования не только при кодировании источника, рассмотренного в разделе 2.3, но и при кодировании канала. Их общей целью является достижение информационного равновесия, характеризуемого седловой точкой, наглядно иллюстрируемой на рис. 2.1.1, подробно обсуждавшейся ранее [79]. Но если методы кодирования источника можно охарактеризовать как устранение избыточности сообщения, то методы кодирования канала характеризуются введением дополнительной избыточности, позволяющей максимально приблизить скорость передачи (при имеющихся ограничениях) к пропускной способности.

Пропускная способность C (бит/с) характеризует количество достоверно передаваемой информации в единицу времени. При этом, верхняя граница C определяется отношением средней мощности сигнала S к средней мощности шума N ($h^2 = S/N$) в канале и полосой его пропускания W (Гц) и рассчитывается в соответствии с теоремой Шеннона согласно выражению [85]:

$$C = W \log_2(1 + h^2), \quad (2.5.1)$$

где основание логарифма указывает на дуальный характер передаваемой информации (предполагает два состояния «0» и «1»).

В свою очередь мощность шума определяется полосой пропускания канала $N = N_0 \Delta F$, где N_0 – спектральная плотность мощности шума. Так как на практике используют модуляционные форматы, в которых одним символом переносится несколько битов информации, то более широкое распространения получила величина

$$h^2 = E_b / N, \quad (2.5.2)$$

где E_b – энергия, приходящаяся на бит переносимой информации.

Таким образом, (2.5.2) можно рассматривать как выражение, характеризующее энергетические характеристики канала.

Введём величину отношения сигнал/шум (ОСШ) в канале h_0^2 , связанную с h^2 соотношением:

$$h_0^2 = h^2 (\Delta F / R), \quad (2.5.3)$$

где R – скорость передачи информации (в реальных каналах значение R никогда не превышает величину C).

Пропотенцировав (2.5.1) и с учётом (2.5.2) можно получить более удобное выражение для характеристики канала:

$$h_0^2 = (W / C) \cdot (2^{C/W} - 1), \quad (2.5.4)$$

или с учётом скорости передачи информации в канале

$$h_0^2 = (W / R) \cdot (2^{C/W} - 1). \quad (2.5.5)$$

Фактически выражение (2.5.4) устанавливает зависимость отношения пропускной способности к доступной полосе от энергетической характеристики канала, а (2.5.5) – зависимость скорости передачи для заданной частотной полосы от ОСШ. Заметим, что (2.5.4) определяет предельное значение для (2.5.5). Графическая интерпретация указанных процессов представлена на рис. 2.5.1.

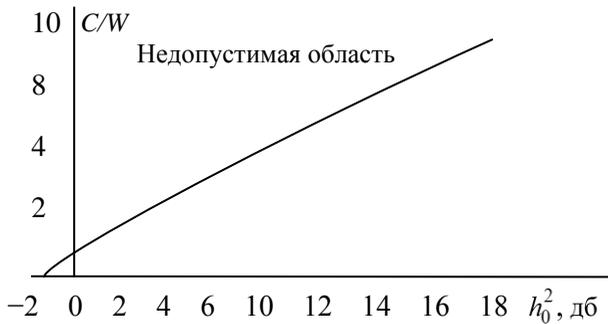


Рис. 2.5.1. Зависимость пропускной способности в полосе канала от ОСШ

Таким образом, скорость передачи информации зависит от качества канала, определяемого значением ОСШ h_0^2 и полосы частот W , необходимой для передачи информации посредством используемого модуляционного формата. Другими словами, чем выше спектральная эффективность сигнальной конструкции, тем выше скорость, т. е. больше объём передаваемой информации при заданном значении h_0^2 . Кривая, представленная на рис. 2.5.1, определяет область допустимых значений для сигнальных конструкций, согласно которой передача информации в канале с ОСШ $h_0^2 \approx -1,6$ дБ в принципе невозможно ни при каких условиях. Указанное значение определено как предел Шеннона [85].

Особенности модуляции, используемой в цифровом телевидении

Одним из основных вопросов, касающихся передачи данных с заданной скоростью, является распределение энергии в спектре электрического сигнала, переносящего информацию, и согласование этого распределения с характеристиками канала связи. По своей природе двоичные сигналы – это последовательность прямоугольных импульсов, для безыскажённой передачи которых теоретически требуется бесконечно большая полоса частот. Однако реальные каналы связи могут обеспечить лишь ограниченную полосу частот, поэтому необходимо согласовывать передаваемые сигналы с параметрами каналов [203], [206], [207].

Такое согласование выполняется благодаря кодированию исходных данных за счёт обеспечения специальной формы импульсов, переносящих данные, например, путём сглаживания прямоугольной формы спектральной плотности импульса по косинусоидальному закону, а также с помощью различных видов модуляции.

Если сообщения передаются двоичными символами, то скорость передачи данных не может превышать значения $2\Delta F_k$ бит/с или 2 бит/с на 1 Гц полосы пропускания канала связи ΔF_k [85]. Предел удельной скорости передачи данных с помощью двоичных символов, равный 2 (бит/с)/Гц, называется также «барьером Найквиста».

Теоретически «барьер Найквиста» может быть преодолен за счёт повышения ОСШ в канале связи до очень большого значения, что практически невозможно, поэтому для повышения удельной скорости передачи данных (преодоления «барьера Найквиста») необходимо перейти к многопозиционной (комбинированной) модуляции [205], при которой каждая электрическая посылка несёт более 1 бита информации.

К способам многопозиционной модуляции, используемым в системах цифрового ТВ, относятся:

- квадратурная амплитудная модуляция (*QAM – Quadrature Amplitude Modulation*),
- квадратурная фазовая манипуляция или четырёхпозиционная фазовая манипуляция (*QPSK – Quadrature Phase Shift Keying*),
- частотное уплотнение с ортогональными несущими (*OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)
- восьмиуровневая амплитудная модуляция с частично подавленной несущей и боковой полосой частот (*8-VSB – Vestigial Side Band*) [41], [204].

При выборе метода модуляции очень важно учитывать характеристики канала передачи. Для каналов спутникового, в том числе и космического цифрового ТВ, в качестве оптимальных (обеспечивающих заданное качество при минимальной сложности ТВ приёмников) были выбраны способы модуляции одной несущей. В системах цифрового спутникового ТВ вещания, целесообразно применять модуляцию типа *QPSK* как в каналах непосредственного ТВ вещания (с полосой 27 МГц), так и в каналах фиксированных служб спутниковой связи (30, 33, 36, 40, 46, 54 и 72 МГц). При этом обеспечиваются:

- достаточно выгодное соотношение мощности и полосы пропускания бортового оборудования ИСЗ;
- возможность работы в условиях характерной для транспондеров нелинейности, обусловленной амплитудной и фазовой характеристиками бортового усилителя;
- простота реализации декодеров, встроенных в спутниковые приёмники.

В противоположность наземным вещательному и кабельным каналам на спутниковый канал линейные помехи оказывают меньшее влияние. Модуляция типа *QPSK* применяется совместно со схемой опережающей коррекции ошибок *FEC* (*Forward Error Correction*), основанной на взаимодействии алгоритмов кода коррекции ошибок Рида–Соломона и свёрточного кода [14], [17]. При этом свёрточный код должен иметь гибкую структуру для работы при разных кодовых скоростях¹, равных 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8. В приёмных устройствах в этом случае используются последовательная демодуляция и мягкое декодирование Витерби. Применение *QPSK*-модуляции позволяет обеспечить устойчивый приём при ОСШ на входе спутникового ТВ приёмника до 6 дБ. Для цифровых кабельных ТВ систем, не имеющих ограничений по мощности, позволяющих регулировать ОСШ и использующих каналы с полосой пропускания 8 МГц, применяется модуляция типа *QAM*. За счёт применения в кабельных цифровых ТВ системах модуляции типа *QAM* отсутствует необходимость во внутреннем коде системы опережающего исправления ошибок [201].

¹ Знаменатель численного значения кодовой скорости соответствует общему количеству битов кодовой комбинации, а числитель – числу информационных битов. Следовательно, по значению кодовой скорости можно оценить число проверочных символов, добавляемых в каждую кодовую комбинацию.

Каналы связи наземного ТВ со стандартными полосами частот 6,7 и 8 МГц значительно отличаются от каналов спутникового, кабельного и космического ТВ. Практически в любом канале связи наземного ТВ возникают помехи из-за многолучевого приёма, обусловленного рельефом местности, и отражений, вызванных как статическими объектами, например, зданиями, так и динамическими объектами, например, самолётами. Каналы связи наземного телевидения отличает высокий уровень промышленных помех. Из-за переполнения частотного диапазона, в котором возможно наземное вещание, велика вероятность интерференционных помех за счёт взаимодействия с сигналами совмещённых и соседних каналов [205].

При выборе способа модуляции в наземном цифровом телевидении следует учитывать способность работы в условиях приёма на комнатные антенны и антенны портативных ТВ приёмников, а также возможность функционирования в одночастотных сетях. При этом приём сигналов цифрового телевидения в мобильных условиях, характерных для космического ТВ, рассматривается как желательная возможность. Способность работы в условиях быстроменяющихся характеристик канала связи также не является абсолютным условием.

Примером одночастотной сети может служить сеть радиопередатчиков малой мощности, располагающихся в зонах плохого приёма сигнала основного передатчика и работающих на той же самой частоте, что и основной. Из всех известных способов модуляции сформулированным выше требованиям отвечают два вида многопозиционной модуляции: 8-VSB и OFDM, которые в настоящее время широко используются в космическом ТВ.

Квадратурная амплитудная модуляция относится к комбинированным видам модуляции [182]. В общем случае QAM промодулированный сигнал представляет собой сумму двух ортогональных несущих: косинусоидальной и синусоидальной, амплитуды которых принимают независимые дискретные значения.

$$U_{QAM}(t) = U_c [c_1(t) \cos(w_c t) + c_2(t) \sin(w_c t)], \quad (2.5.16)$$

где U_c – амплитуда сигнала; w_c – частота несущей; $c_1(t)$, $c_2(t)$ – модулирующие сигналы в квадратурных каналах. При приёме сигналов с QAM производится когерентное детектирование.

Если в выражении (2.5.16) модулирующие сигналы $c_1(t)$, $c_2(t)$ принимают значения ± 1 , то получим QAM-4 (четырёхпозиционную QAM). Если же для модуляции как в синфазном, так и в квадратурном каналах используются четырёхуровневые сигналы

$\{c_1(t), c_2(t)\} = \pm 1; \pm 3$, то получаем 16-позиционную *QAM* (*QAM-16*), которую можно описать следующим выражением:

$$U_{QAM-16}(t) = \sum_{i=1}^{16} A_i \cos(\omega_c t + \Theta_i), \quad (2.5.17)$$

и представить в фазово-амплитудном пространстве в виде констелляционной диаграммы (см. рис. 2.5.7), где точками показаны положения концов вектора сигнала A_i при различных значениях i .

Оси координат на рис. 2.5.7 соответствуют синфазной I и квадратурной Q составляющим сигнала.

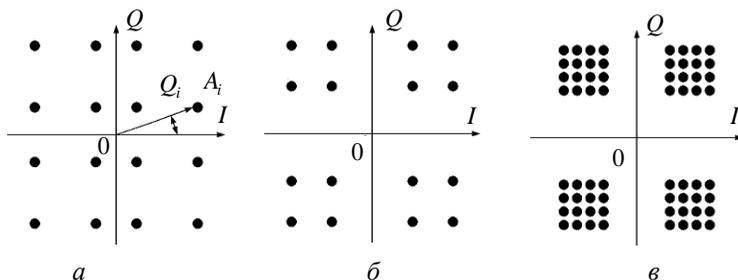


Рис. 2.5.7. Векторная диаграмма возможных состояний сигнала *QAM-16*:

при $\chi = 1 - a$; при $\chi = 2 - \bar{b}$; при $\chi = 4 - v$

Кроме модуляции *QAM-16* в системах цифрового ТВ широко используется *QAM-64* (числа означают количество вариантов суммарного сигнала). Расположение сигнальных точек в фазово-амплитудном пространстве при различных типах *QAM* определяют сигнальные созвездия модулированных сигналов.

Практически используются как обычные равномерные, так и неравномерные сигнальные созвездия с различными расстояниями между двумя ближайшими точками созвездия в смежных квадрантах [196], что количественно оценивается коэффициентом неравномерности сигнального созвездия χ .

Данный параметр равен отношению расстояния между соседними точками в двух разных квадрантах к расстоянию между точками в одном квадранте. Применительно к модуляции типа *QAM-16* и *QAM-64* рекомендуются три значения коэффициента χ : $\chi = 1$, соответствует обычной *QAM* с равномерным сигнальным созвездием (рис. 2.5.7a); $\chi = 2$, характеризует *QAM* с неравномерным сигнальным созвездием, когда расстояние между двумя ближайшими точками созвездия в смежных квадрантах в два раза

больше расстояния в пределах одного квадранта (рис. 2.5.7б); $\chi = 4$ оценивает *QAM* с неравномерным сигнальным созвездием, когда различие расстояний между точками внутри и между квадрантами является четырёхкратным (рис. 2.5.7в).

Применение неравномерной структуры сигнальных созвездий с коэффициентами $\chi = 2$, $\chi = 4$ обеспечивает улучшение декодирования потока данных, модулированных методами *QAM-16* и *QAM-64*. Однако при этом требуется увеличение ОСШ для потока данных, так как шумы и помехи трансформируют сигнальные точки созвездия в «облака». Центром «облака» остается сигнальная точка, а его «размытость» характеризует остаточный уровень несущей, нарушение баланса уровней сигналов *I* и *Q*, коэффициент модуляционных ошибок и другие параметры.

При очень сильном шуме различить сигнальные точки внутри квадрантов становится практически невозможным. Однако, благодаря введённой неравномерности в сигнальные созвездия, сигнальные точки между квадрантами различаются достаточно хорошо, т. е. декодирование может осуществляться с приемлемой вероятностью ошибок [185], [198], [201].

На практике модуляция типа *QAM-16* при $\chi = 1$ обеспечивает удельную скорость передачи данных, равную 3,9 (бит/с)/Гц, а *QAM-16* при $\chi = 2$ уже 4,5 (бит/с)/Гц. Пропускная способность кабельной сети с полосой канала 8 МГц составляет 38,5 Мбит/с при модуляции *QAM-64*.

Модуляция *QPSK* относится к дискретной фазовой манипуляции с основным дискретом $\pi/2$. В этом методе модуляции все импульсы входной информационной последовательности модулятора разбиваются на пары, так называемые двухбитовые символы, и при переходе от символа к символу начальная фаза сигнала изменяется на величину Δ_j , которая определяется битами символа в соответствии с алгоритмом, приведённом в табл. 2.5.1.

Таблица 2.5.1. Закон фазовой манипуляции метода *QPSK*

Биты входной последовательности модулятора		Изменение фазы Δ_j
Нечётные биты символа x	Чётные биты символа y	
1	1	$-3\pi/4$
0	1	$3\pi/4$
0	0	$\pi/4$
1	0	$-\pi/4$

Обобщенная функциональная схема модулятора *QPSK* приведена на рис. 2.5.8.

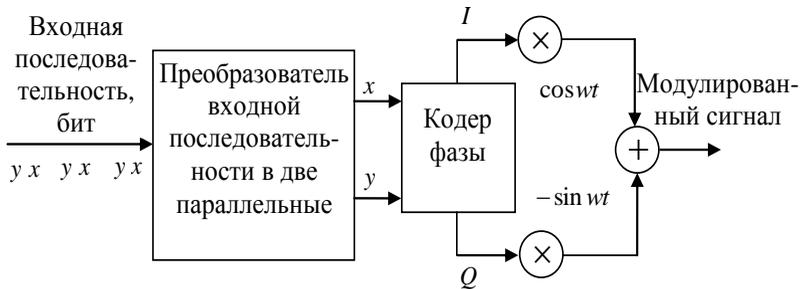


Рис. 2.5.8. Функциональная схема модулятора *QPSK*

В современных стандартах цифрового ТВ широкое применение получил способ частотного уплотнения с ортогональными несущими (*OFDM*). Сущность модуляции *OFDM* состоит в передаче потока данных с помощью большого числа несущих.

Аналогично квадратурной модуляции способ *OFDM* использует ортогональные несущие, равномерно распределённые в выделенном диапазоне частот в соответствии с кратностью некоторой основной частоте f_0 .

На практике частоты несущих соответствуют уравнению

$$U_n(t) = U_0 \cos [2\pi (f_0 + n/T_S)t], \quad (2.5.18)$$

где f_0 – начало интервала, в котором производится частотное уплотнение; n – номер несущей, находящийся в диапазоне от 0 до $(N - 1)$, т. е. всего несущих N ; T_S – длительность интервала передачи одного символа.

Анализ выражения (2.5.18) подтверждает, что несущие действительно являются ортогональными, т. е. их среднее (по времени) произведение равно нулю. Это позволяет разделить их на приёме даже при частичном перекрытии их боковых полос.

Схема, иллюстрирующая принцип модуляции типа *OFDM*, приведена на рис. 2.5.9. Сначала последовательный поток передаваемых данных демультиплексируется, т. е. разделяется на заданное число (N) параллельных потоков, трансформируясь в параллельную форму. Каждый из параллельных сигналов поступает на свой модулятор, в котором одна из ортогональных несущих подвергается модуляции какого-либо типа. Довольно часто в качестве первичного метода модуляции несущих используется дифференциальная относительная фазовая модуляция (ДОФМ) и квадратурная амплитудная модуляция типа *16-QAM* или *64-QAM*, а также *QPSK*.

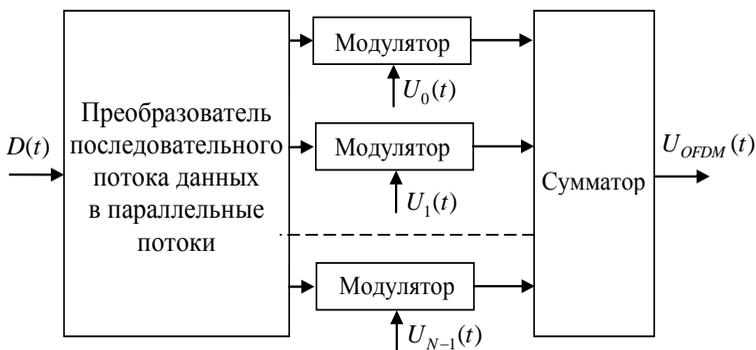


Рис. 2.5.9. Функциональная схема устройства модуляции типа OFDM

Поскольку даже в условиях сравнительно небольшой скорости потока данных (каждая несущая переносит поток данных, уменьшенный в число раз, равное количеству несущих M), переносимого каждой несущей, возможны межсимвольные искажения, то для борьбы с ними используют защитные интервалы перед каждым передаваемым символом.

При этом структуру и заполнение защитного интервала выбирают таким образом, чтобы сохранить ортогональность принимаемых несущих. Так как в пределах защитного интервала передаётся фрагмент полезного сигнала, то он выбирается исходя из условия, что эхо-сигнал при многолучевом распространении будет задержан не более чем на длительность защитного интервала. Поэтому величина защитного интервала зависит от расстояния между радиопередатчиками в одночастотных сетях ТВ вещания или от задержки естественного эхо-сигнала в сетях вещания с традиционным распределением частотных каналов. Чем больше время задержки, тем больше должна быть длительность защитного интервала.

С другой стороны, для обеспечения максимальной скорости передаваемого потока данных защитный интервал должен быть как можно короче. На практике его величина составляет одну четвёртую часть от длительности полезного интервала и для одночастотных сетей составляет порядка 250 мкс.

Значение шага несущих частот связано с шириной основного лепестка спектра одного модулированного несущего колебания и определяется величиной, обратной длительности полезного интервала, поэтому расстояние между соседними несущими будет равно примерно 1 кГц. Тогда при ширине полосы частот канала 8 МГц и шаге 1 кГц число несущих может достигать 8000.

Между тем, для передачи данных в системе ТВЧ достаточно скорости потока данных 20 Мбит/с (с учётом применения компрессии). В этом случае за 1 мс (время одного символа) должно быть передано 20 кбит, т. е. менее 3 битов на одну несущую за время одного символа. Такая величина может быть реализована с использованием 8-позиционных символов, что даёт довольно высокую степень помехозащищённости. При числе несущих в несколько тысяч возникает сложность технической реализации функциональной схемы, представленной на рис. 2.5.9. В связи с этим, на практике модуляцию *OFDM* реализуют посредством процедур быстрого прямого и обратного преобразований Фурье (БПФ и ОБПФ), рис. 2.5.10.

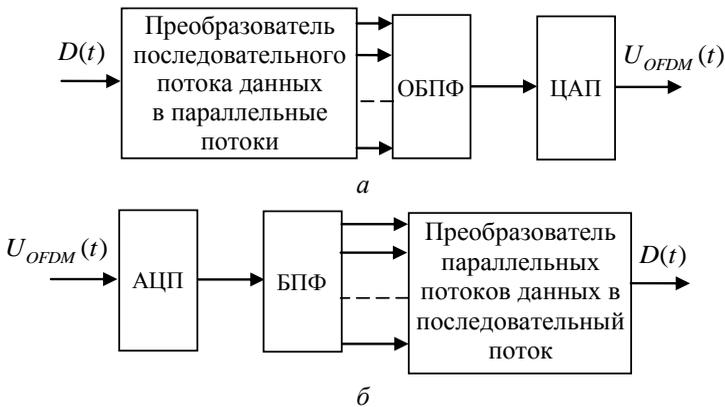


Рис. 2.5.10. Функциональные схемы модуляции (а) и демодуляции (б) сигналов *OFDM* на основе обратного и прямого преобразований Фурье

Действительно, перемножение некоторых коэффициентов на гармонические колебания разных частот, удовлетворяющих вышеприведённым условиям, и суммирование полученных произведений представляет собой не что иное, как вычисление ОБПФ (см. рис. 2.5.10а), коэффициентами для вычисления которого являются распараллеленные потоки данных.

Демодуляция такого сигнала может быть реализована на основе процедур БПФ (см. рис. 2.5.10б). Естественно, что в этом случае на входе должен стоять АЦП. В большинстве быстрых алгоритмов Фурье размер массива, подвергающегося преобразованию, кратен целой степени числа 2, поэтому в телевизионных системах используют массивы размера $N = 8192 = 8k$ или $N = 2048 = 2k$ (здесь $k = 2^{10} = 1024$).

На практике число информационных несущих меньше, часть из них не используется, поскольку между полосами соседних каналов должен быть оставлен некоторый зазор.

В двух предложенных в настоящее время режимах используются 6817 и 1705 несущих, но по размерности массива быстрого преобразования Фурье системы модуляции называются соответственно $8k$ OFDM и $2k$ OFDM.

Режим $2k$ пригоден для вещания одиночным передатчиком и для построения малых одночастотных сетей с ограниченными расстояниями между передатчиками. Режим $8k$ применяется в тех случаях, когда необходимо построение больших одночастотных сетей.

В канале связи с шириной полосы 8 МГц система модуляции OFDM занимает полосу 7,61 МГц, а разнос несущих равен 4464 Гц (режим $2k$) или 1116 Гц (режим $8k$).

Передаваемый сигнал, модулированный способом OFDM, организован в кадры. Четыре кадра образуют суперкадр. Каждый кадр состоит из 68 символов, каждый символ – из 6817 несущих (режим $8k = 8192$), из которых часть используется для синхронизации и управления. Число полезных несущих равно 6048. Для режима $2k = 2048$ из 1705 несущих полезными являются 1512.

Однако многолучевое распространение радиосигнала в точку приёма (довольно типичное для космического ТВ) приводит к ослаблению и даже полному подавлению некоторых несущих вследствие интерференции прямого и задержанного сигналов. Решению этой проблемы помогает кодирование с целью обнаружения и исправления ошибок в канале передачи данных [201].

Кодирование превращает OFDM в COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), которая более эффективна в условиях многолучевого приёма.

Так, если по каналу связи с резко выраженной неравномерностью АЧХ передаётся одна модулированная несущая, то ослабление отдельных частотных составляющих можно компенсировать с помощью частотного корректора (хотя и за счёт снижения ОСШ); если какая-нибудь составляющая подавлена полностью, сигнал претерпевает необратимые искажения. Если данные передаются с помощью частотного уплотнения, то даже полное исчезновение сигналов отдельных несущих не является критичным, поскольку данные, переносимые этими несущими, могут быть восстановлены за счёт канального кодирования. Контейнер данных COFDM приспособлен к условиям передачи данных благодаря возможности отдельной обработки сигналов от разных несущих.

Применение *COFDM* позволило организовать сети ТВ вещания с перекрытием частот передающих станций, работающих на одной частоте. Скорость передачи данных в канале связи с модуляцией типа *COFDM* зависит от вида модуляции несущих, установленных значений кодовой скорости и защитного интервала между символами. Если кодовая скорость находится в пределах от $1/2$ до $7/8$ (разность между знаменателем и числителем равна числу добавленных проверочных битов), то скорость цифровой передачи составляет при:

- ДОМ – 4,98...10,56 Мбит/с;
- 16-*QAM* – 9,95...21,11 Мбит/с;
- 64-*QAM* – 14,93...31,67 Мбит/с.

Для достижения требуемой помехоустойчивости модулирующие потоки данных могут кодироваться кодами с разными скоростями.

В системах цифрового ТВ применяют и многоуровневую амплитудную модуляцию с частично подавленной несущей и боковой полосой частот (*VSB*). Модуляция типа *VSB* обеспечивает достаточно высокую эффективность использования полосы частот канала связи. Для модуляции типа *VSB* допустимы как двухпозиционный модулирующий сигнал, так и многопозиционный. При двухпозиционной передаче, обозначаемой как 2-*VSB*, модулирующий сигнал совпадает по форме с сигналом передаваемых данных и принимает в интервале каждого символа один из двух уровней (характеристические значения его симметричны относительно нуля, например +1 и –1). Достижимая при этом удельная скорость передачи данных соответствует 1,79 (бит/с)/Гц, т. е. является близкой к теоретическому пределу.

При многопозиционной передаче характеристические значения, располагающиеся симметрично относительно нуля, выбираются так, чтобы интервалы между ними были одинаковыми. Например, при восьмипозиционной передаче в системе 8-*VSB* модулирующий сигнал принимает в интервале символа одно из восьми значений (–7, –5, –3, –1, +1, +3, +5, +7). В интервале одного символа передаются три двоичных разряда потока данных. При увеличенной в три раза удельной скорости в полосе 6 МГц система 8-*VSB* способна передавать поток данных 32,3 Мбит/с.

В настоящее время разработано несколько вариантов модуляции типа *VSB*: 2-*VSB*, 4-*VSB*, 8-*VSB*, 8T-*VSB*, 16-*VSB*. Количество уровней модулирующего сигнала меняется от двух до шестнадцати, при этом соответственно изменяется и скорость

передачи данных, вычисляемая как частота следования символов, умноженная на логарифм количества уровней.

Чем больше количество уровней модулирующего сигнала, тем меньше помехозащищённость. Исключением из этого правила является только система *8T-VSB*, в которой используется дополнительное кодирование с целью борьбы с помехами (буква *T* – *Trellis* символизирует наименование этого кодирования – решетчатый код). Скорость этого кода равна $2/3$, т. е. к каждому двум передаваемым битам добавляется один проверочный. Кодирование увеличивает помехозащищённость, но снижает скорость передачи данных по сравнению с системой *8-VSB*. Общий объём передаваемых за единицу времени полезных данных в системе *8T-VSB* такой же, как в *4-VSB*. Модуляция типа *8T-VSB* была выбрана для наземного ТВ вещания, характеризуемого сравнительно высоким уровнем помех, а *16-VSB* – для кабельного цифрового ТВ вещания.

Методология канального кодирования, реализуемая в системах спутникового и космического телевидения

Наиболее близко по своей сущности к космическому ТВ спутниковое телевизионное вещание. К основным, предъявляемым к ним требованиям, следует отнести обеспечение качественной передачи ТВС при значительном удалении источника от приёмников абонентов и уверенного вещания в условиях негативного влияния атмосферы и географических особенностей местности.

При этом многие спутниковые ТВ системы рассчитаны на приём ТВС посредством простых индивидуальных или коллективных установок с небольшими индивидуальными антеннами. Согласно классификации Регламента радиосвязи к радиовещательной спутниковой службе (PCC) (*Broadcasting Satellite Service – BSS*) относятся, так называемые спутники непосредственного телевизионного вещания (НТВ), работающие в диапазоне частот 12 ГГц.

Во многих странах широко используются системы подачи и распределения телевизионных программ через искусственные спутники Земли (ИСЗ) малой и средней мощности в диапазоне частот 11 ГГц, относящихся к фиксированной спутниковой службе (ФСС) (*Fixed Satellite Service – FSS*). Первоначально эти системы обеспечивали приём ТВС на головные станции кабельных систем, рассчитанные на большое количество абонентов или на эфирные ретрансляторы для последующего их распределения. В настоящее время возможен приём сигналов с ИСЗ ФСС на недорогие приёмные антенны типа *SMATV (Satellite Master Antenna TV* – антенны

спутникового ТВ коллективного пользования), вполне доступные корпоративным или даже индивидуальным пользователям.

Современные цифровые технологии снизили требования к мощности ретрансляторов ИСЗ службы спутникового вещания РСС для диапазона 12 ГГц. В связи с этим МСЭ принял новую классификацию, где спутниковые системы подразделяются на системы прямого спутникового вещания *DTH (Direct-To-Home)* и первичного распределения ТВС *PD (Primary Distribution)*. На смену термину НТВ пришло понятие непосредственный приём, т. е. *DTH*, не связанное с конкретными службами и диапазонами частот. Легализация индивидуального приёма ТВ программ с любых ИСЗ осуществлена Брюссельской конференцией 1974 года и закреплена законодательствами многих стран.

Особенностью ИСЗ является ограниченность их энергетического потенциала, поэтому в спутниковом ТВ вещании используют методы обработки, требующие минимального ОСШ на входе демодулятора в обмен, например, на полосу частот сигнала.

Если в аналоговом ТВ вещании это был выбор частотной модуляции, а не амплитудной, то в цифровом ТВ применяют более эффективное каскадное помехоустойчивое кодирование и модуляцию с невысокими кратностями, например, *QPSK* (ФМ-4) [183].

Специфической особенностью спутникового вещательного ретранслятора является работа в нелинейном режиме вблизи точки насыщения выходного усилительного прибора, т. к. именно в этом режиме удаётся получить максимальную выходную мощность и до предела снизить диаметр приёмных параболических антенн. Из-за существенной нелинейности работа в точке насыщения возможна только на одной несущей в стволе – это, так называемый, режим *MCPC (Multiple Channelsper Carrier)* – несколько каналов на одной несущей), когда цифровые потоки нескольких ТВ объединяются (мультиплексируются) в общий поток и модулируют единственную несущую частоту с одной передающей станцией.

Нелинейный режим вынуждает использовать модуляцию с постоянной огибающей, к которой относится *QPSK*. Альтернативный вариант передачи – *SCPC (Single Channelper Carrier)* – один канал на одной несущей) требует перехода в линейный (точнее, квазилинейный) режим со снижением выходной мощности на 2,5...4 дБ. Этот режим неэффективен и применяется только тогда, когда в одном стволе передают на сеть приёмных станций несколько ТВ программ, источники которых территориально разнесены и не могут собрать сигналы в одной точке, а потому вынуждены строить

свои собственные передающие станции. В последнее время распространение получили линейаризаторы спутникового канала, позволяющие работать с другими видами модуляции, не обязательно с постоянной огибающей. Они позволяют использовать восьмипозиционную фазовую модуляцию (ФМ-8), т. е. 8-PSK или QAM-16.

Полосы частот ретрансляторов спутников, работающих в Европе в диапазонах ФСС и РСС, лежат от 26 до 72 МГц. Следующее поколение спутников для прямого вещания на индивидуальные доменные антенны использует ретрансляторы с шириной полосы частот в 33 МГц. В любом случае выбор ширины полосы частот зависит от заданного типа спутника и скорости передачи данных.

Число точек стояния ИСЗ на геостационарной орбите и, соответственно, радиочастотных каналов относится к ограниченным ресурсам. Органом, регулирующим эти ресурсы, включая распределение частот, является Всемирная административная конференция по радио (ВАКР), ведущая работы через МСЭ.

На заседаниях ВАКР-2000 был принят план РСС, по которому Россия получила по 16 радиоканалов, полностью защищённых от влияния других сигналов, в каждой из четырёх орбитальных позиций 36°, 56°, 86°, 140° и 10 спутниковых радиоканалов в позиции 110° восточной долготы (всего 74 радиоканала).

Российский ресурс спутниковых радиоканалов позволяет обеспечить на всей территории страны многопрограммное спутниковое ТВ вещание как центральных, так и региональных программ.

Современные методы канального кодирования цифрового потока MPEG-TS для использования в спутниковом ТВ вещании впервые были закреплены в стандарте DVB-S (*Digital Video Broadcasting, EN 300421*) [14], [17]. Последовательность этапов обработки цифрового потока представлена на рис. 2.5.11.

Пришедшие на вход модулятора транспортные пакеты длиной 188 байт содержат синхробайт и 187 байтов данных. В модуляторе формируется сигнал внутреннего цикла синхронизации, включающий 8 пакетов: первый пакет с инвертированной стартовой синхрогруппой, остальные – с неинвертированной. На данном этапе цель синхронизации в устранении неопределённости фазы при передаче данных.

Символьная синхронизация осуществляется сигналом тактовой частоты транспортных пакетов, а цикловая синхронизация – инвертированными стартовыми синхрогруппами [197]

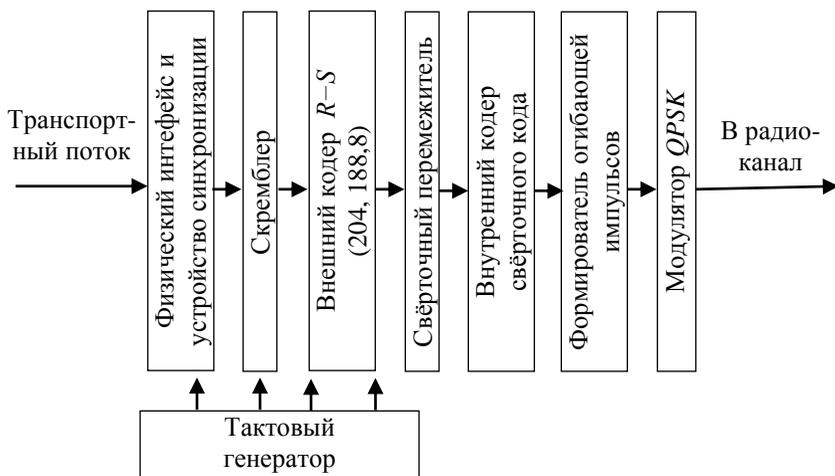


Рис. 2.5.11. Структурная схема устройства обработки транспортного потока в системе DVB-S

Для предотвращения несанкционированного приёма транспортный поток поступает на скремблер, где происходит его суммирование с сигналом псевдослучайной последовательности.

После скремблирования данные транспортных пакетов подвергаются помехоустойчивому кодированию каскадным кодом, в котором в качестве внешнего используется код Рида–Соломона ($R-S$), в качестве внутреннего – свёрточный код.

Код Рида–Соломона устойчиво работает при вероятности ошибок на входе декодера не выше 2×10^{-4} , устраняя ошибки, с которыми не справился декодер свёрточного кода. В результате выходная вероятность ошибок находится в пределах от $10^{-10} \dots 10^{-11}$.

Для защиты от пакетных ошибок большой длительности в кодере осуществляется свёрточное перемежение данных. В декодере производится деперемежение, то есть восстанавливается первоначальный порядок следования данных.

Стандарт $DVB-S$ предполагает использование свёрточного кода с длиной кодового ограничения $K = 7$ и следующими значениями относительной скорости кодирования: $1/2$, $2/3$, $3/4$, $5/6$, $7/8$. Переключение с базовой скорости $1/2$ на другие значения осуществляется выборочным вычёркиванием (перфорированием) некоторых символов. Это несколько снижает корректирующую способность кода, но при этом уменьшает и его избыточность, позволяя увеличить скорость передачи данных системой $DVB-S$.

Декодер свёрточного кода реализует первый уровень защиты и, работая при коэффициенте ошибок входного сигнала $10^{-1} \dots 10^{-2}$, снижает коэффициент ошибок в выходном сигнале до значения 2×10^{-4} , необходимого для работы кода Рида–Соломона.

Основным видом модуляции в системе *DVB-S* принята *QPSK*, хотя при ограниченном частотном ресурсе могут использоваться ФМ-8 и даже *QAM-16*. Применение опережающей коррекции ошибок, т. е. *FEC*-кодирования, позволяет значительно снизить требуемое для работы *QPSK*-демодулятора отношение энергии, приходящейся на один бит, к спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 (рис. 2.5.12).

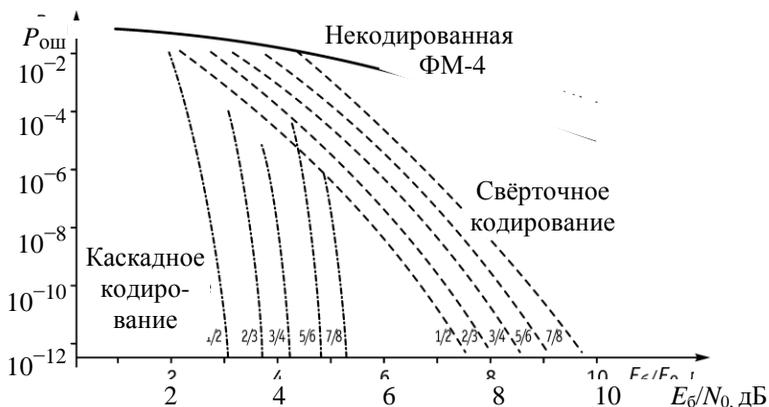


Рис. 2.5.12. Зависимости вероятности ошибки $P_{ош}$ от отношения E_b/N_0 для *QPSK*-модуляции при разных относительных скоростях кодирования

Стандарт *DVB-S2* представляет второе поколение стандарта для спутникового цифрового ТВ вещания. Он разработан Консорциумом *DVB Project* в 2003 г. и зарегистрирован под номером *EN 302307* в Европейском институте стандартов электросвязи (*ETSI*).

Целью разработки стандарта *DVB-S2* было создание системы связи, которая позволила бы повысить эффективность использования спутникового канала связи, т. е. предоставить возможность передавать в заданной полосе частот поток данных с более высокой скоростью при минимальных затратах на приёмной стороне.

С целью повышения (на 30%) эффективности использования спектра в системе *DVB-S2* применены самые последние разработки в области канального кодирования (*Low-density parity-check code LDPC* - коды) в сочетании с разными способами модуляции [181], [183].

Для интерактивных приложений «точка-точка», таких как однонаправленная адресная рассылка данных (*IP unicasting*), Интернет-навигация, возможно использование режима адаптивного кодирования (*ACM – Adaptive Coding & Modulation*), позволившего оптимизировать параметры передачи для каждого клиента от пакета к пакету, в зависимости от условий приёма.

Применение режима *ACM* возможно только при наличии обратного канала для контроля эффективности выбранных параметров передачи. Режим *ACM* позволяет получить выигрыш в использовании спектра, значительно превышающий 30%.

Стандарт *DVB-S2* предусматривает применение четырёх видов модуляции – *QPSK*, *8-PSK* (ФМ-8), *16-APSK*¹ и *32-APSK*. Первые два способа модуляции используются в вещательных ТВ сетях, в которых передатчики транспондеров работают в нелинейных режимах, близких к насыщению. В случае применения в ТВ вещании двух последних типов модуляции требуется более высокое ОСШ на приёме, а на передающей стороне должно при этом осуществляться предискажение сигнала, чтобы компенсировать нелинейность транспондера. И хотя эти типы модуляции требуют больших затрат энергии, они обеспечивают более высокую спектральную эффективность (удельная скорость передачи данных равна, соответственно: 4 бит/с/Гц и 5 бит/с/Гц) [183], [200].

Перспективы применения в космическом телевидении альтернативных методов канального кодирования

Переход к цифровым технологиям обработки сигналов способствовал активному развитию различных методов кодирования канала, в том числе с использованием перезапросов искажённых блоков информации, а также коррекции ошибок за счёт использования помехоустойчивых кодов. Причём если в обратных каналах интерактивных систем возможно комбинированное применение обоих методов, то в трактах космического телевидения возможно применение только метода прямого исправления ошибок.

Существующее разнообразие помехоустойчивых кодов стимулирует к анализу их возможностей с позиций применимости в системах космического телевидения. С одной стороны, казалось бы, существующие стандарты, в частности *DVB-S(2)*, должны в полной мере удовлетворять даже самым изысканным запросам потребителя. С другой – необходимо учитывать основную научную проблему космического телевидения, которая состоит в равновесном

¹ *Adaptive Phase Shift Keying* – адаптивная фазовая манипуляция

согласовании источника и канала (см. раздел 2.1) с учётом концепции малокадрового телевидения [1] и вектора концепции системы, включающего весовые коэффициенты при скорости передачи, допустимой ошибке передаче и сложности кодера (см. раздел 2.3).

Таким образом, выбор кода имеет свою специфику, обусловленную указными выше причинами. Различные классы помехоустойчивых кодов отличаются друг от друга структурой, функциональным назначением, энергетической эффективностью, а также реализационными алгоритмами кодирования и декодирования. Среди помехоустойчивых кодов большое место занимают блочные, особенность которых заключается в том, что операции кодирования и декодирования осуществляются над символами только в пределах последовательности, ограниченной их размерами [17]. Основными параметрами блочного кода являются общая длина кодовой последовательности (кодového слова) n , длина его информационной части k , скорость кода $r = k/n$ и минимальное кодовое расстояние d_{\min} , определяющее минимальное различие между двумя любыми кодовыми словами длиной n .

В общем случае все существующие коды разделяются на линейные и нелинейные. Однако на практике преимущественно используются линейные, поскольку для них применима алгебраическая операция сложения, что значительно упрощает реализацию алгоритмов обработки.

Процесс кодирования блочного кода состоит в разбиении последовательности битов на сообщения $\mathbf{U} = (u_0, u_1, \dots, u_{k-1})$ длины k , с последующим их отображением в кодовые слова $\mathbf{C} = (c_0, c_1, \dots, c_{k-1})$ посредством следующей операции

$$\mathbf{C} = \mathbf{U} \mathbf{G}, \quad (2.5.19)$$

где \mathbf{G} – порождающая матрица (n, k) кода.

Более удобным видом преобразования (2.5.19) является следующее его представление в систематической форме:

$$\mathbf{C} = \mathbf{U} \mathbf{V}, \quad (2.5.20)$$

где \mathbf{V} – проверочная часть кодового слова \mathbf{C} из $m = n - k$ символов. В этом случае порождающая матрица такого систематического кода будет иметь вид:

$$\mathbf{G} = \mathbf{I}_k \cdot \mathbf{P}, \quad (2.5.21)$$

где \mathbf{I}_k – единичная матрица размером $k \times k$, формирующая информационную часть кодового слова \mathbf{C} ; \mathbf{P} – матрица проверочных символов размером $k \times (n - k)$.

Ортогональным преобразованием к порождающей матрице является проверочная матрица \mathbf{H} , такая, что:

$$\mathbf{G} \times \mathbf{H}^T = 0, \quad (2.5.22)$$

Проверочная матрица используется при декодировании, поскольку это позволяет выявить искажённые символы в принятом кодовом слове. Действительно, если допустить, что принятое слово $\mathbf{Y} = \mathbf{C} + \mathbf{E}$ будет подвержено влиянию шумов \mathbf{E} , то вычисление синдрома \mathbf{S} в общем случае даёт возможность определить положение ошибочных символов:

$$\mathbf{S} = \mathbf{Y} \mathbf{H}^T = (\mathbf{C} + \mathbf{E}) \mathbf{H}^T = \mathbf{C} \mathbf{H}^T + \mathbf{E} \mathbf{H}^T = \mathbf{E} \mathbf{H}^T. \quad (2.5.23)$$

Причём их местоположение можно определить по значениям символов синдрома. И лишь результат $\mathbf{S} = 0$ указывает на отсутствие ошибок в принятом кодовом слове.

Важным подклассом линейных кодов являются циклические, в которых кодовые слова образуются циклическим сдвигом элементов кодовой последовательности. Так, если кодовое слово $\mathbf{C} = (c_0, c_1, \dots, c_m, \dots, c_{k-1})$ принадлежит множеству $\{\mathbf{C}\}_n$, то и любой циклический сдвиг его элементов также порождает кодовое слово $\mathbf{C}_m = (c_m, \dots, c_{n-1}, \dots, c_0, c_1)$, принадлежащее $\{\mathbf{C}\}_n$.

Циклические коды размерностью (n, k) можно представить посредством порождающего полинома $g(x)$ степени $(n - k)$ с коэффициентами из поля $\mathbf{GF}(g)$. Для двоичных кодов $g = \{0, 1\}$ имеем

$$g(x) = g_0x^0 + g_1x^1 + g_2x^2 + \dots + g_{n-k}x^{n-k}. \quad (2.5.24)$$

Использование полинома (2.5.24) позволяет операцию (2.5.19) для циклических кодов представить как

$$C(x) = U(x) g(x). \quad (2.5.25)$$

Образующие полиномы циклического кода можно записать путём перечисления степеней с ненулевыми коэффициентами. Следует отметить, что конструктивная длина кода K , определяющая сложность его декодирования, равна длине самого длинного регистра сдвига формирующего кодера. Важнейшим показателем системы кодирования является её помехоустойчивость [17], оцениваемая средней вероятностью ошибки в информационном бите P_b или кодовом слове P_B при заданном ОСШ. Для линейного блочного кода длиной n , декодируемого по критерию максимального правдоподобия значения P_b и P_B рассчитывают по формулам, полученным в [184, 201]:

$$P_B \leq \sum_{j=1}^n N_j P_c(j), \quad P_b \leq \sum_{j=1}^n \frac{j}{k} N_j P_c(j) \quad (2.5.26)$$

где k – число информационных символов; N_j – число кодовых слов веса j ;

$$P_c(j) = \begin{cases} \sum_{i=(j+1)/2}^j C_j^i p^i (1-p)^{j-i} & \text{– для ДСК при нечётном } j; \\ \frac{1}{2} C_j^i p^i (1-p)^{j-i} + \sum_{i=(j/2)+1}^j C_j^i p^i (1-p)^{j-i} & \text{– для ДСК при чётном } j; \\ Q(\sqrt{2j E_s / N_0}) & \text{– для канала с гауссовым шумом,} \end{cases} \quad (2.5.27)$$

где p – вероятность битовой ошибки в канале; E_s/N_0 – значение

ОСШ в канале; $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$.

Другим важным показателем эффективности кода является показатель энергетического выигрыша кодирования (ЭВК), характеризующий величину снижения энергии, необходимой для передачи одного бита при заданной величине P_b с использованием алгоритмов кодирования–декодирования, по отношению, когда кодирование отсутствует. Асимптотический ЭВК зависит от скорости кода r и кодового расстояния d . Для систем с двоичной фазовой манипуляцией при приёме без квантования он равен

$$G_a = 10 \lg rd. \quad (2.5.28)$$

Для двоичного симметричного канала (ДСК)

$$G_a = 10 \lg r(t+1). \quad (2.5.29)$$

где t – максимальное целое, меньшее, чем $d/2$, определяющее число исправляемых кодом ошибок.

Анализ выражений (2.5.28) и (2.5.29) позволяет заключить, что при приёме в целом ЭВК обеспечивается на 3 дБ больший, чем при жестких решениях демодулятора. Между тем, согласно [184], на практике при средних значениях ОСШ и умеренных величинах d , указанная разница составляет 1...2 дБ. Использование же модема с квантованием выходного значения на 8 и 16 уровней уменьшает ЭВК по сравнению с приёмом в целом примерно на 0,25 и 0,1 дБ, соответственно.

Практически важной характеристикой алгоритмов декодирования является программно-аппаратная сложность их реализации. Одними из самых простых блоковых кодов являются коды Хэмминга [17] с параметрами (n, k) вида $(2^m - 1, 2^m - m - 1)$, где $m = n - k$ – число проверочных символов кода. Поскольку у кодов Хэмминга $d_{\min} = 3$, то они способны обнаруживать две и исправлять одну ошибку. Важной особенностью кодов Хэмминга является то, что для них полностью известно распределение весов кодовых слов, определяемое функцией

$$N(x) = \sum_{i=0}^n N_i x^i, \quad (2.5.30)$$

где N_i – число кодовых слов веса i .

Согласно [184] при $d_{\min} = 3$ и $n = 2^m - 1$ весовая функция принимает вид

$$N(x) = \frac{1}{n+1} \left[(1+x)^n + n(1+x)^{(n-1)/2} (1-x)^{(n+1)/2} \right]. \quad (5.31)$$

На практике используют две разновидности кодов Хэмминга – укороченные и расширенные. Укороченные коды получают при исключении какой-либо проверки. А расширенные – путём введения дополнительной проверки на чётность всех символов кодового слова. В этом случае имеем $d_{\min} = 4$. В результате код позволяет исправлять одну и обнаруживать две или только обнаруживать три ошибки. Спектр расширенных кодов Хэмминга будет задаваться весовой функцией вида

$$N(x) = \frac{1}{2n} \left[(1+x)^n + (1-x)^n + 2(n-1)(1-x^2)^{n/2} \right]. \quad (2.5.32)$$

Результаты практических экспериментов в [17] показали, что коды Хэмминга обладают относительно слабой корректирующей способностью. Так на рис. 2.5.13 *a* показана зависимость P_b от вероятности ошибки в канале, а на рис. 2.5.13 *б* – зависимость от значения ОСШ $h^2 = E_b/N_0$ на бит для кодов Хэмминга $m = 7$ и $m = 3$ при работе в ДСК.

Между значениями p и h^2 существует зависимость:

$$p = Q \left(\sqrt{2 \frac{E_s}{N_0}} \right) = Q \left(\sqrt{2r \frac{E_b}{N_0}} \right), \quad (2.5.33)$$

где $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$; r – скорость кода.

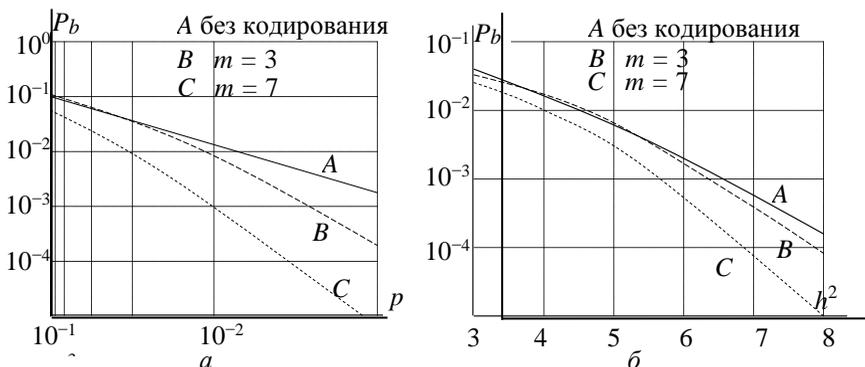


Рис. 2.5.13. Характеристика кодов Хэмминга в ДСК

Следует отметить, что перспектива применения кодов Хэмминга видится только в составе схем каскадного кодирования.

Обобщением кодов Хэмминга являются коды Боуза–Чоудхури–Хоквингема (БЧХ) [185], представляющие класс линейных циклических кодов, исправляющих кратные ошибки.

Примитивным кодом БЧХ [184], исправляющим t ошибок, называется блочный код длиной $n = q^m - 1$ над полем Галуа $GF(q^m)$. Асимптотические оценки зависимости P_B в q -ичном символе P_s и бите P_b при декодировании кодов БЧХ по максимуму правдоподобия имеют вид [185]:

$$P_B = \sum_{i=t+1}^n C_n^i P_q^i (1 - P_q)^{n-i}, \quad P_s \leq \frac{1}{n} \sum_{i=t+1}^n (i+t) C_n^i P_q^i (1 - P_q)^{n-i},$$

$$P_b = \frac{q/2}{q-1} P_s. \quad (2.5.34)$$

Представленные формулы верны, когда кодовый блок декодируется неверно при наличии в нём более чем t ошибочных символов, а неправильно декодированное кодовое слово отличается от переданного не более чем в $(i + t)$ q -ичных символах.

На рис. 2.5.14а представлены экспериментальные данные об оценке эффективности кодов БЧХ. Их анализ показывает снижение энергетической эффективности кодов БЧХ с уменьшением размерности кода, что указывает на целесообразность использования относительно длинных кодов. Экспериментальные данные, полученные в [184] и характеризующие помехоустойчивость кодов БЧХ, изображены на рис. 2.5.14 б.

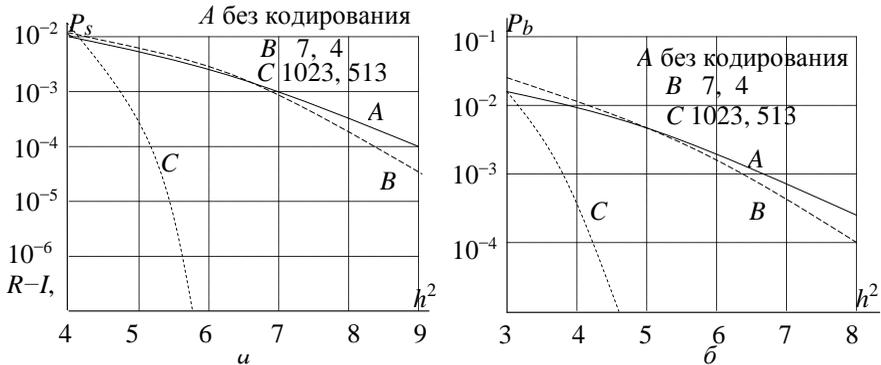


Рис. 2.5.14. Оценка характеристик кодов БЧХ в ДСК для скорости $r = 1/2$

На основе указанных данных можно заключить, что вероятность ошибки на бит и на символ близки по своим значениям [185], что указывает на правомерность выражений (2.5.34).

Коды БЧХ обладают лучшей эффективностью по отношению к кодам Хэмминга, но их значительная вычислительная сложность при возрастании длины кода ограничивает непосредственное практическое применение [185], поэтому они используются в качестве составных элементов каскадных кодов.

Важным подклассом кодов БЧХ являются недвоичные коды Рида-Соломона (КРС), для которых $m = m_0 = 1$. Основными параметрами КРС рассматривают кодировочную скорость $r = k/n$, длину блока $n = q - 1$, где q – число символов, в котором количество информационных символов k варьирует от 1 до $n - 1$. Минимальное кодовое расстояние для КРС определяется как

$$d_{\min} = n - k + 1. \quad (2.5.35)$$

Формируются КРС с помощью порождающего многочлена вида

$$g(x) = (x - \alpha) (x - \alpha^2) \dots (x - \alpha^{2t}), \quad (2.5.36)$$

где $t = \frac{1}{2}(d_{\min} - 1)$.

Согласно (2.5.36) КРС имеют $2t$ поверочных символов в образующем полиноме, что даёт возможность исправлять пакеты из t ошибок. Для декодирования КРС разработаны достаточно эффективные алгоритмы на основе жестких решений, позволяющие работать с достаточно длинными кодами в системах с q -ичной модуляцией.

Для оценки эффективности КРС в [185] использовано выражение (2.5.34). На рис. 2.5.15 представлена зависимость оценки вероятности символьной ошибки P_s от вероятности ошибки P_q в q -ичном симметричном канале для различных значений q и кодовых скоростей r . Анализ представленных результатов позволяет

заключить, что эффективность КРС существенно зависит от величины q и возрастает с её ростом.

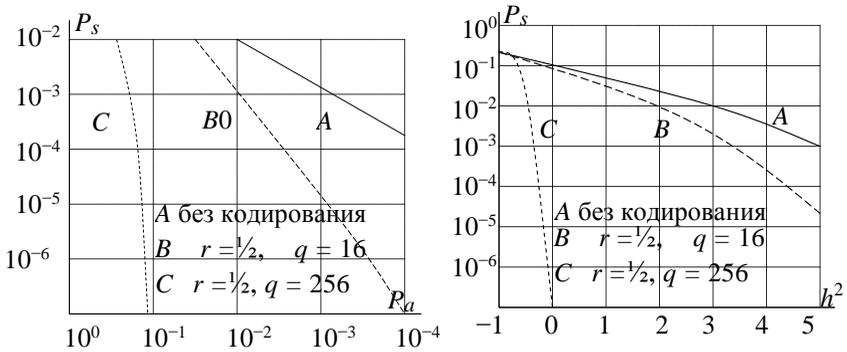


Рис. 2.5.15. Оценка характеристик КРС в q -ичном симметричном канале

В настоящее время широкое практическое распространение получили самоортогональные коды (СОК), относящиеся к классу линейных блочных мажоритарно декодируемых кодов [17]. Применение СОК предполагает многопороговое декодирование (МПД), при котором система всех проверок, контролирующая произвольный символ e_0 , является ортогональной относительно данного символа. Задают СОК с помощью образующих полиномов $g(x)$, разностные треугольники которых не содержат одинаковых элементов. Согласно [184] разностные треугольники представляют набор разностей между всеми членами с ненулевыми степенями.

Блочный СОК характеризуют кодовым расстоянием d , равным увеличенному на 1 количеству ненулевых компонент образующего полинома. Число информационных символов k в блочном СОК с кодовой скоростью $r = 1/2$ равно $2m + 1$, где m – максимальная степень образующего полинома. Тогда длина n такого СОК будет равна $2k$. Для оценки эффективности блочного СОК можно использовать значение оценки вероятности ошибки на бит P_b [184].

$$P_b = \begin{cases} \sum_{i=(d+1)/2}^d C_d^i p^i (1-p)^{d-i} & \text{– для ДСК при нечётном } d; \\ \frac{1}{2} C_d^{d/2} p^{d/2} (1-p)^{d/2} + \sum_{i=(d/2)+1}^d C_d^i p^i (1-p)^{d-i} & \text{– для ДСК при чётном } d; \\ Q(\sqrt{2d E_s / N_0}) & \text{– для канала с гауссовым шумом.} \end{cases} \quad (5.37)$$

На рис. 2.5.16. показана зависимость оценки P_b от ОСШ при работе СОК в ДСК.



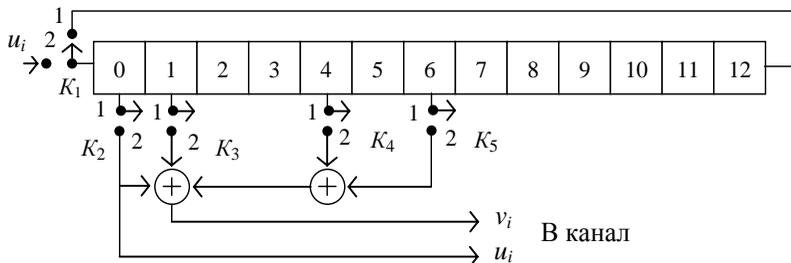
Рис. 2.5.16. Оценка характеристик СОК в ДСК для различных значений d

Изложенное позволяет считать, что в классе блочных кодов наибольшей помехоустойчивостью обладают коды Рида–Соломона и мажоритарно декодируемые коды. Именно поэтому они нашли широкое применение во многих стандартах телевидения. Между тем, КРС требуют достаточно широкодиапазонных каналов, поскольку задействованы в системах с q -ичной модуляцией.

Применение СОК позволяет использовать алгоритмы мягкого декодирования, увеличивающих выигрыш от кодирования на 2 дБ. Кроме того, к мажоритарно декодируемым кодам применимы алгоритмы многопорогового принятия решения, что существенно повышает их эффективность, а отсутствие ограничений по длине кода фактически исключает в них размножение ошибок. Особое место в классе блочных кодов отводится линейным мажоритарно декодируемым кодам (ЛМДК), образующим ортогональные проверки и допускающим принятие решения по критерию максимального правдоподобия. Принцип декодирования ЛМДК основан на свойствах ортогональности их проверочных уравнений по отношению к возможным ошибкам. К разновидностям ЛМДК относят СОК, допускающие МПД. Как правило, СОК формируются на основе образующих полиномов $g(x)$, разностные треугольники которых не содержат одинаковых элементов. Для кодера СОК (см. рис. 2.5.17) длиной $n = 26$, содержащего $k = 13$ информационных символов с кодовым расстоянием $d = 5$, формируемого полиномом $g(x) = x^0 + x^1 + x^4 + x^6$, разностный треугольник имеет вид

$$\begin{array}{ccc}
 1-0; & 4-0; & 6-0 & & 1; & 4; & 6 \\
 & 4-1; & 6-1 & \Rightarrow & & 3; & 5 \\
 & & 6-4 & & & & 2
 \end{array}$$

Работает указанный кодер следующим образом. В первоначальный момент последовательность информационных символов u_i поступает на регистры сдвига, а все коммутаторы K находятся в положении «1». Затем коммутаторы переводятся в положение «2» и начинается этап формирования кодовой комбинации. На каждый такт с выхода кодера в канал параллельно поступают информационные символы и комбинация проверочных символов, формируемая на сумматорах с выходов 0, 1, 4 и 6-го регистра кодера.



u_i — информационные символы K — коммутатор
 v_i — проверочные символы \oplus — сумматор по модулю два

Рис. 2.5.17. Структурная схема самоортогонального кодера длиной (26, 13)

Проверочная матрица $\mathbf{H} = [\mathbf{P}^T \mathbf{I}_{n-k}]$ для СОК формируется на основе порождающего полинома $g(x)$. Здесь \mathbf{I} — единичная матрица размером $(n-k) \times (n-k)$; \mathbf{P} — проверочная матрица размером $k \times (n-k)$. Для рассматриваемого случая размер матрицы \mathbf{H} будет (13×26) . Вероятность ошибки на бит P_b при оптимальном декодировании СОК для ДСК и канала с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ) оценивается согласно [184] как

$$P_b \leq \frac{1}{k} \sum_{j=1}^n j N_j P_c(j), \quad (2.5.38)$$

где N_j — число кодовых слов веса j , а

$$P_c(j) = \begin{cases} \sum_{i=(d+1)/2}^d C_d^i p^i (1-p)^{d-i} & \text{— для ДСК при нечётном } d; \\ \frac{1}{2} C_d^{d/2} p^{d/2} (1-p)^{d/2} + \sum_{i=(d/2)+1}^j C_d^i p^i (1-p)^{d-i} & \text{— для ДСК при чётном } d; \\ Q(\sqrt{2d E_s / N_0}) & \text{— для АБГШ,} \end{cases} \quad (2.5.39)$$

где p – вероятность ошибки на входе декодера; $h^2 = E_s/N_0$ – ОСШ в канале; $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$.

На рис. 2.5.18 показаны графики зависимости P_b от ОСШ при работе в ДСК и АБГШ.

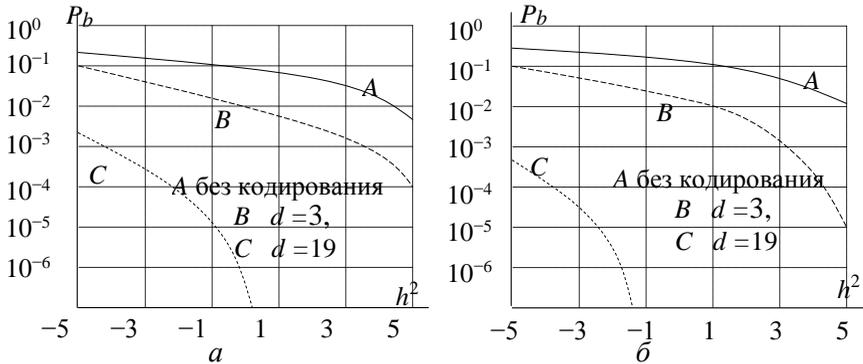


Рис. 2.5.18. Оценка характеристик оптимального декодирования СОК и для различных значений d в: ДСК – a ; АБГШ – b

Традиционно для блочных кодов, к которым относятся ЛМДК, декодирование осуществляется с использованием подхода, предложенного Меггитом [17], исправляющего пакет ошибок простым алгебраическим методом на основе критерия максимального правдоподобия. Однако его применение в каналах передачи телевизионной информации не целесообразно, поскольку реализационная сложность декодера Меггита экспоненциально растёт с числом исправляемых ошибок.

Интересным решением при работе в АБГШ является применение алгоритмов Чейза [184]. Они базируются на принципе жесткого декодирования нескольких пробных последовательностей, специально формируемых внесением в вектор жёстких решений относительно мягких решений демодулятора различных комбинаций ошибок. Следует заметить, что необходимость, так называемого, предварительного обучения такого декодера снижает его практическую ценность для систем передачи телевизионной информации, поскольку применение длинных кодов в этом случае заметно снижает общую производительность системы декодирования.

Между тем, Дж. Месси обоснована [186] целесообразность применения для ЛМДК принципа порогового (мажоритарного) декодирования. Сущность данного подхода заключается в том, что

в принимаемой кодовой комбинации выделяют информационную часть, которую подают на декодер, где из неё формируют проверочную комбинацию символов, аналогично тому, как это делается на передающем конце. Затем сформированные проверочные символы складывают по модулю два с проверочными символами принятой реализации и заполняют ими синдромный регистр. Далее проверочные элементы синдромного регистра суммируются и поступают на пороговый элемент (ПЭ), где сравниваются с априори установленным значением, и в случае его превышения инвертируют соответствующий им информационный символ принятой кодовой комбинации. С целью пояснения особенностей работы принципа рассмотрим пример реализации порогового декодера (ПДК) (рис. 2.5.19) для СОК (26, 13), представленного на рис. 2.5.17.

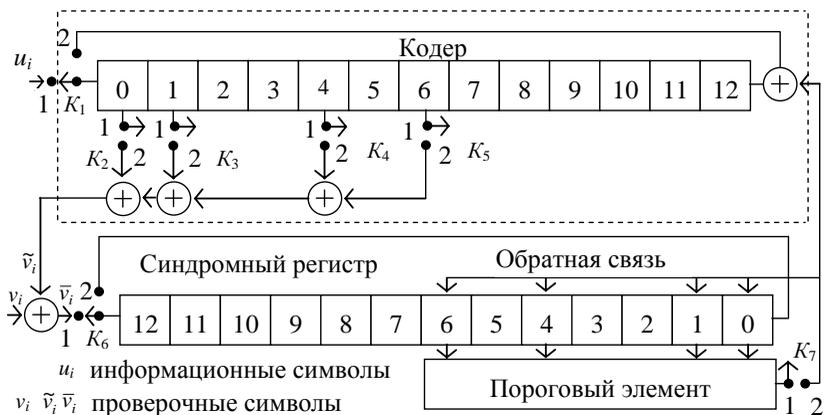


Рис. 2.5.19. Структурная схема ПДК СОК длиной (26, 13)

В начале из последовательности u_i формируются проверочные символы \tilde{v}_i , которые по модулю 2 складываются с принятыми проверочными символами v_i на коммутаторе K_6 (в начальный момент все ключи в положении «1»). Затем рассчитанные значения $\bar{v}_i = v_i + \tilde{v}_i$ поступают в синдромный регистр. После его заполнения все коммутаторы переводятся в положение «2» и начинается процесс декодирования информационного символа u_{12} . С этой целью в ПЭ суммируются элементы синдромного регистра, соответствующие декодированному символу (для u_{12} имеем сумму $v_{\Sigma 12} = \bar{v}_0 + \bar{v}_1 + \bar{v}_4 + \bar{v}_6$) и сравниваются с априори установленным

пороговым значением $v_{\text{пор}}$. Таким образом выходной символ с ПЭ y_i будет определяться:

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{если } \sum v_i^0 + v_i^1 + v_i^4 + v_i^6 \geq v_{\text{пор}}; \\ 0 & \text{если } \sum v_i^0 + v_i^1 + v_i^4 + v_i^6 < v_{\text{пор}}, \end{cases}$$

здесь верхний символ v обозначает позицию ячейки синдромного регистра, участвующую в суммировании, а нижний индекс – текущее значение скорректированного символа.

Из синдромного регистра выходной символ y_i поступает на входной сумматор кодера (рис. 2.5.19). Если значение y_i будет равно единице, то соответствующий информационный символ будет инвертирован. Затем осуществляется циклический сдвиг содержимого регистров и происходит декодирование следующего символа. Учитывая, что рассмотренный ПДК является устройством с обратной связью, то исправляемая в информационном регистре ошибка удаляется из синдромного регистра. Наличие обратной связи может привести к размножению ошибок, поскольку в синдром по цепи обратной связи дополнительно поступают $d-1$ собственных ошибок. Для устранения рассмотренного явления в [184] предложено применять СОК с низкой долей общих проверок или использовать дефинитное декодирование без обратной связи. Так, дефинитный декодер при работе с СОК в ДСК обеспечивает вероятность ошибки в информационном бите P_b при скоростях $r = (n-1)/n$, определяемую выражением:

$$P_b = (1-p) \sum_{i=T+1}^J C_J^i P^i (1-P)^{J-i} + p \sum_{i=T+1}^J C_J^i P^i (1-P)^{J-i}, \quad (2.5.40)$$

где p – вероятность искажения бита в канале; J – число слагаемых полинома $J = d-1$; $P = (1 - (1-2p)^{J(n-1)})/2$ – вероятность ошибки проверочного символа; $T = (d-1)/2$ – величина порога.

На рис. 2.5.20 показаны зависимости оценки (2.5.27) от ОСШ для СОК при различных d . Анализ компьютерного моделирования в [187] показал, что при ОСШ ниже 3,5 дБ эффективность дефинитного декодера снижается с увеличением значения d . Реализационная сложность такого декодера экспоненциально растёт с увеличением d . При фиксированном значении кодового ОСШ СОК с более высокой кодовой скоростью обладают лучшей помехоустойчивостью. Согласно [17] характеристики дефинитных декодеров при $P_b = 10^{-5}$ оказываются на 0,25 дБ хуже, чем у ПДК с обратной связью. Переход к мягким решениям в ПДК позволяет

повысить их эффективность примерно на 0,3 дБ. В этом случае в ПЭ происходит суммирование элементов синдрома с весом, зависящим от надежности символов, участвующих в формировании элемента синдрома. Кроме того, эффективность декодирования можно повысить и за счет использования, так называемых, длинных кодов.

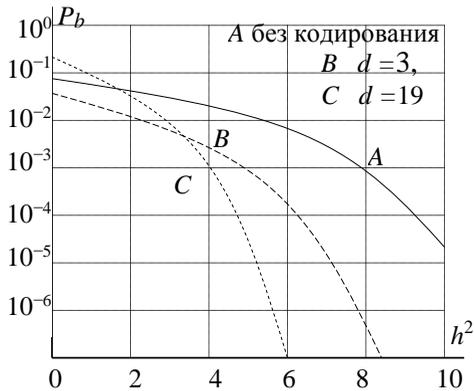


Рис. 2.5.20. Оценка эффективности дефинитного ПДК для СОК с $r = 1/2$ в ДСК

Сложность программной реализации ПДК рассчитывается исходя из необходимости реализации $d - 1$ операций сложения целых чисел (подсчёт суммы в ПЭ), операции сравнения с порогом, d операций сложения по модулю 2 (при коррекции информационного символа), приходящихся на один декодируемый информационный бит. При этом для вычисления синдрома необходимо ещё осуществить $d - 1$ операций сложения по модулю 2. Таким образом, среднее количество операций, необходимых для декодирования одного информационного бита, составит $2d$.

К сожалению, пока ещё не все перспективные технологии кодирования и декодирования канала нашли своё применение в современных системах космического ТВ. Однако, столкнувшись со сложностью задач, обусловленных, например, необходимостью работы в дальнем космосе далеко за пределами солнечной системы, разработчики вынуждены будут искать новые научные решения, в том числе и в вопросах эффективного кодирования ТВ канала. Возможно, тогда рассмотренная методология обретёт практическую реализацию в приёмно-передающих системах, заложенных на «спортивно-романтическом» этапе становления космического ТВ в нашей стране [1].

Конечно, канальное кодирование не решает всех проблем космического телевидения. Выполнение жестких требований, предъявляемых к качеству передаваемого изображения, приводит к необходимости передачи значительного объема видеоданных [202]. В таких условиях, учитывая специфику «малокадровости» космического ТВ, важная роль отводится формированию ТВС на канальном уровне. С одной стороны, жесткие требования к качеству передаваемого видеоизображения стимулируют к применению сложных многопозиционных конструкций, обеспечивающих высокую скорость передачи информации, а другой – частотная ограниченность канала и достаточно низкие значения ОСШ, обусловленные значительным удалением телевизионных камер от потребителей, требуют применения помехоустойчивых сигналов.

Указанная проблема особенно усугубляется на этапах автономной стыковки, когда в результате осевого вращения космических аппаратов создаются зоны «радиотени», приводящей к глубоким замираниям сигнала. В таких условиях каждый децибел энергетического выигрыша становится залогом успеха поистине «космического» масштаба (см. разделы 2.3, 3.4, [62], [112]).

В настоящее время в телевидении используются сигнальные конструкции (СК), формируемые методом синтеза результирующего сигнала $s_r(t)$ на основе его синфазной и квадратурной составляющих (здесь и далее $r = \overline{0, M-1}$). В частности, в современных стандартах цифрового телевидения *DVB-T2* и *DVB-S2* находят применения сигналы квадратурной амплитудной манипуляции (КАМ) [182].

В общем случае помехоустойчивость СК определяется таким показателем как минимальное евклидово расстояние (МЕР) d_E , который представляет наименьшее геометрическое расстояние между точками сигнального созвездия (конstellационной диаграммы). Другим важным энергетическим показателем СК является пик-фактор (ПФ), рассчитываемый как отношение максимальной мощности к её среднему значению [188]. Именно с позиций показателя МЕР сигналы КАМ предпочтительнее, чем многомерные сигналы фазовой манипуляции, но по показателю ПФ они проигрывают последним.

С целью повышения помехоустойчивости в телевизионном стандарте *DVB-T2* предложена трансформация constellационных диаграмм сигналов, формируемых методом квадратурного синтеза. Указанные процедуры позволяют определить каждой точке

сигнального созвездия независимые координаты, которые дают возможность воссоздать констелляционную диаграмму даже по одной восстановленной координате, и тем самым повысить помехоустойчивость демодуляции. Оригинальность такого подхода позволяет повысить общую энергетику канала до 5 дБ [182]. Однако проведенный сотрудниками НИИ телевидения анализ показал, что предлагаемая в стандарте *DVB-T2* трансформация не изменяет энергетические параметры СК, т.е. повышение помехоустойчивости достигается только за счёт получения независимых координат точек сигнального созвездия.

Данный факт открывает дополнительные возможности повышения энергетики СК за счёт их внутренней трансформации. Действительно, математическая модель канала связи для M -ного сигнала $s_r(t)$ с символьным интервалом T можно представить как

$$z(t) = \mu(t)s_r(t) + \xi(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (2.5.41)$$

где $\mu(t)$ - коэффициент передачи канала; $\xi(t)$ - АБГШ с односторонней спектральной плотностью шума N_0 .

Удобство выбора формулы (2.5.41) в качестве аналитической модели канала объясняется тем, что для $\mu(t) = 1$ имеем классический случай канала с АБГШ, а при $\mu(t) = \mu$, где μ - случайная величина, приходим к каналу с неселективными замираниями. Если же допустить, что $T < \tau_s$, где τ_s - интервал замираний, фазу принимаемого сигнала $z(t)$ можно оценить без ошибок.

В соответствии с теоремой ортогонализации Грамма-Шмидта [189] произвольный сигнал $s_r(t)$ может быть представлен в виде

$$s_r(t) = \sum_{v=1}^N s_{rv} \phi_v(t),$$

где $\phi_v(t)$ - базисные функции.

Такой подход позволяет перейти к геометрической интерпретации сигналов и рассматривать их в конечном евклидовом пространстве. При этом энергия любого сигнала может быть определена как

$$E_r = \sum_{v=1}^N s_{rv}^2.$$

Поскольку энергия конечна, $E_r < \infty$, то

очевидно, что среди всех возможных СК есть конструкции, имеющие максимальную энергию, которую будем обозначать E_m :

$$E_m = \max_{r=0, M-1} E_r. \quad \text{В этом случае } E_r \leq E_m.$$

Тогда среднюю энергию сигнала можно определить как

$$E_c = \sum_{r=0}^{M-1} p(r) E_r,$$

где $p(r)$ – априорная вероятность передачи r -го сигнала.

Для равновероятных сигналов, т. е. когда $p(r) = 1/M$ [188]:

$$E_c = \frac{1}{M} \sum_{r=0}^{M-1} E_r.$$

Рассмотрим энергетические показатели произвольного сигнала $s_r(t)$, одним из которых является ПФ, рассчитываемый как отношение максимальной энергии к её среднему значению:

$$\Pi^2 = E_m / E_c. \quad (2.5.42)$$

Другим важным показателем, характеризующим энергетические свойства СК, является МЕР, определяющее минимальную геометрическую разность между двумя сигналами $d_{rk} = \|s_r - s_k\|$,

или $d_{rk} = \sqrt{\sum_{v=1}^N (s_{rv} - s_{kv})^2}$. В этом случае МЕР определим как

$$d_E = \min_{r \neq k} d_{r,k}, \quad r, k = \overline{0, M-1};$$

отличную от нуля, если $r \neq k$. В своей совокупности энергетические показатели определяют коэффициент помехоустойчивости СК

$$g_m = \left(\frac{d}{2\sqrt{E_m}} \right)^2 \quad \text{и} \quad g_c = \left(\frac{d}{2\sqrt{E_c}} \right)^2.$$

Отношение максимальной и средней энергий к спектральной плотности шума определяется, соответственно, как

$$h_m^2 = \frac{E_m}{N_0} \quad \text{и} \quad h_c^2 = \frac{E_c}{N_0}.$$

Тогда значение максимальной энергии сигнала можно представить как [190]: $h_m^2 = \Pi^2 h_c^2 \frac{E_m}{N_0}$. При таком подходе величины

$E_{bm} = \frac{E_m}{\log_2 M}$ и $E_{bc} = \frac{E_c}{\log_2 M}$ – представляют собой максимальное

и среднее значение энергии затраченной для передачи одного бита,

$$а \quad h_{bm}^2 = \frac{E_{bm}}{N_0}, \quad h_{bc}^2 = \frac{E_{bc}}{N_0}, \quad h_{bm}^2 = \Pi_c^2 h_{bc}^2 \quad \text{и} \quad h_c^2 = h_{bc}^2 \log_2 M.$$

Таким образом, помехоустойчивость СК определяется его энергетическими показателями. Следовательно, их использование в качестве критерия оценки позволяет сравнивать СК между собой. Причём равенство энергетических показателей СК даёт возможность утверждать, что они обладают одинаковыми свойствами помехоустойчивости.

Наиболее типичным представителем сигналов квадратурной модуляции является СК КАМ-16, трансформируемые версии которых в стандарте *DVB-T2* передаются по каналу с *OFDM* [190]. Сущность указанной трансформации состоит в повороте плоскости сигнального созвездия на 16,8 градусов (рис. 2.5.21) [188]. В результате поворота сигнального созвездия каждая точка констелляционной диаграммы получила свои координаты по осям Q и I , которые принадлежат только ей, т. е. значения I_A и Q_A больше не встречаются ни у одной из точек фазовой плоскости, кроме искомой точки A (рис. 2.5.21а). В результате открывается возможность восстановления искомого положения точки A всего по одному из значений I_A или Q_A . Однако рассматриваемая трансформация не является единственно возможной. В частности, предлагается другой подход, представленный на рис. 2.5.21б.

Согласно предлагаемому подходу для сигнального созвездия каждого из квадрантов констелляционной диаграммы реализовано своё независимое вращение. В качестве условий предлагаемой трансформации рассматривались: сохранение величины МЕР и обеспечение для каждой точки сигнального созвездия пары её уникальных координат по осям I и Q . В относительных значениях координат, представленных на рис. 2.5.21, значения МЕР одинаковы у обоих созвездий, что даёт основание предположить, что по данному показателю помехоустойчивости они близки друг к другу.

Однако расчёт средней энергии и ПФ показал, что значения этих показателей предпочтительней у сигнала КАМ-16, созвездия которых трансформированы на основе предлагаемого подхода. В частности, по показателю ПФ выигрыш составит порядка 5%, а по показателю средней энергии – почти 15%.

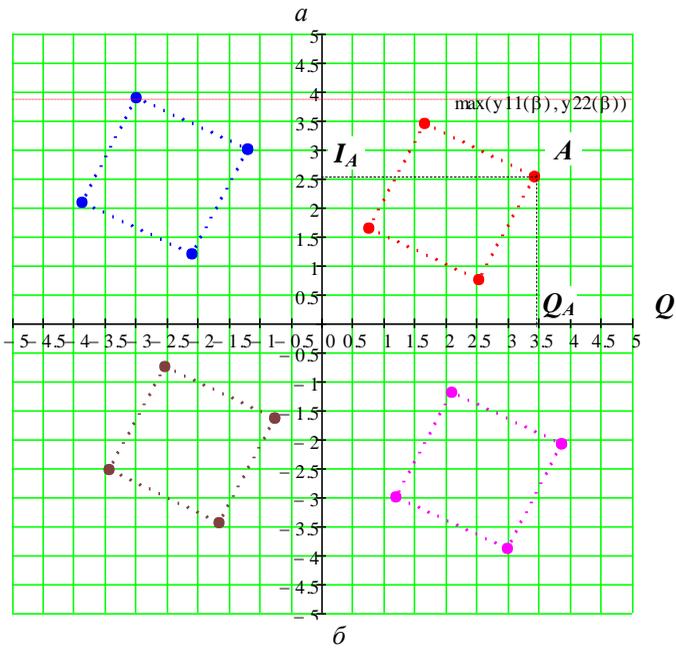
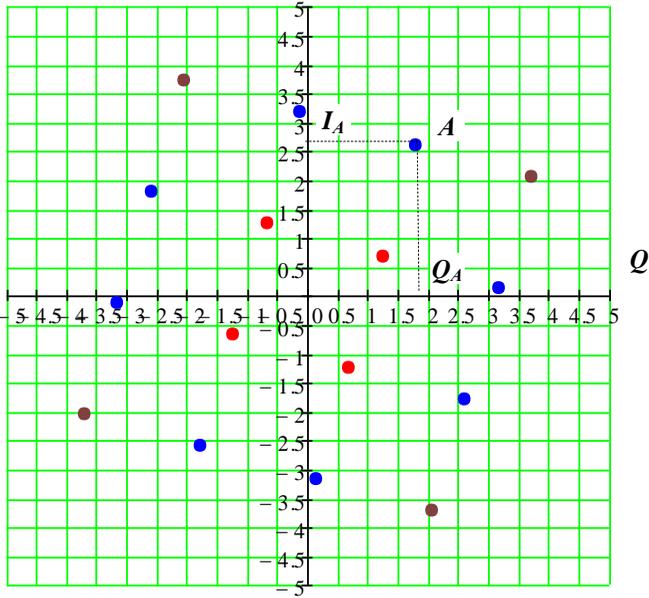


Рис. 2.5.21. Конstellационная диаграмма сигнала КАМ-16 трансформированная по: стандарту *DVB-T2* – *a*;
по альтернативному варианту – *б*

Предложенный подход¹ к трансформации сигналов КАМ-16 при *оптимальном повороте* констелляционной диаграммы позволит повысить помехоустойчивость по сравнению с подходом, используемым в стандарте *DVB-T2*, почти на 15%. При этом в формируемых СК значение минимального евклидова расстояния не изменяется, а показатель пик-фактора снижается почти на 5%. Также данный подход позволяет получить сигнальное созвездие, каждая точка которого имеет уникальные координаты в пространстве I и Q . Причём разность градаций координатных значений по осям будет такой же, как и у созвездия, трансформированного по стандарту *DVB-T2*. Предложенная конструкция КАМ-16 может быть демодулирована и в соответствии со стандартом *DVB-T2*, но такое решение приведёт к снижению уровня помехоустойчивости не менее чем на 6 дБ.

Спецификацией *ETSI EN 302 755 V1.2.1* (2011-02) определено использование не только СК типа КАМ-16, но и КАМ-64, и КАМ-256. Применение указанных видов манипуляции связано с возможностью организации на их основе высокоскоростной передачи видео. Однако, несмотря на трансформации, определяемые указанной спецификацией, данные СК обладают достаточно большим значением ПФ, что обусловлено существенным различием пиковой мощности результирующих векторов (в технической литературе их часто называют векторами сигнального созвездия (ВСС)), представляющих сумму значений синфазной и квадратурной составляющих сигнала [190]. При этом поиски решений, направленные на снижение ПФ СК, неизбежно связаны с трансформацией их констелляционных диаграмм, что в свою очередь ведёт к изменению евклидова расстояния между ВСС и, как следствие, к изменению помехоустойчивости.

Объективно возникает противоречие, обусловленное необходимостью снижения пиковой мощности отдельных ВСС при сохранении заданного показателя помехоустойчивости СК в целом. Но снижение пиковой мощности ВСС, предусматривающее изменение их геометрических размеров, неизбежно ведёт к трансформации констелляционной диаграммы СК, и как результат, – к изменению евклидова расстояния.

¹ Методы трансформации отдельных точек сигнальных созвездий на фазовых плоскостях получили новое развитие, в том числе и благодаря работам, проводимым в АО «НИИ телевидения».

Таким образом, очевиден поиск компромиссных решений, позволяющих при общем снижении ПФ в результате трансформации констелляционной диаграммы СК, сохранить требуемый уровень её помехоустойчивости.

Предположим, что канал передачи видео функционирует в условиях воздействия быстрых замираний, аппроксимируемых законом распределения Релея (характерная ситуация при стыковке космических аппаратов). Для рассматриваемых условий точки ВСС любого квадранта СК будут определяться следующим образом $\bar{x}_a = \sqrt{P_a} \bar{s}_a$, $\bar{x}_b = \sqrt{P_b} \bar{s}_b$, где $\sqrt{P_a}$, $\sqrt{P_b}$ – эффективные значения напряжений ВСС, определяющие мощность СК; \bar{s}_a , \bar{s}_b – единичные вектора, определяющие положение точки ВСС относительно осей синфазной и квадратурной составляющих на плоскости констелляционной диаграммы, причём $\bar{s}_a^T \times \bar{s}_b = 1$.

Обозначим величину, определяющую взаимное расположение точек ВСС, как $\lambda^2 = |\bar{s}_a^T \times \bar{s}_b|^2$. При этом $\lambda^2 \neq 1$ (в противном случае ВСС переходит сам в себя).

Рассчитаем вероятность ошибки приёма элемента сигнала с позиций проявления вероятности парной ошибки ($P(\bar{x}_a \rightarrow \bar{x}_b)$), под которой будем понимать вероятность правильного отображения точки ВСС, т. е. вероятность проявления вектора \bar{x}_b при условии, что должен отображаться вектор \bar{x}_a . Для аналитического представления вероятности парной ошибки с учётом трансформации СК воспользуемся подходом, изложенным в [191]:

$$\begin{aligned}
 P(\bar{x}_a \rightarrow \bar{x}_b) = & 0,5[1 - \text{sgn}(q_m)] \times \exp(-|q_m| k_m [1 + \text{sgn}(q_m)]) - \\
 & - 0,5 \left[1 + \frac{1 + h_0 P_b}{k_m^2 h_0^2 P_a P_b (1 - \lambda^2(a, b))} \right]^{-1/2} \times \\
 & \times \exp \left(- \left(\text{sgn}(q_m) + 0,5 \left[1 + \frac{1 + h_0 P_b}{k_m^2 h_0^2 P_a P_b (1 - \lambda^2(a, b))} \right]^{-1/2} \right) \right) + \quad (2.5.43) \\
 & + 0,5 \text{sgn}(q_m) \exp \left(- \left(\text{sgn}(q_m) + 0,5 \sqrt{1 + \frac{1 + h_0 P_b}{k_m^2 h_0^2 P_a P_b (1 - \lambda^2(a, b))}} \right) k_m |q_m| \right)
 \end{aligned}$$

где $k_m = \frac{h_0 P_a (1 - \lambda^2(a, b)) + P_b / P_a - 1}{2h_0 P_a (1 - \lambda^2(a, b))}$, $q_m = \frac{1 + h_0 P_a}{1 + h_0 P_b}$ – промежуточные

параметры расчёта; h_0^2 – значение ОСШ; P_a, P_b – мощности ВСС СК.

Результаты моделирования ситуации, представленные на рис. 2.5.22, характеризуют зависимость вероятности парной ошибки от величины мощности одного из векторов, в частности P_a (значение мощности вектора $P_b = 1$ Вт); представленные на рис. 2.5.23 – зависимость вероятности парной ошибки от значения мощности P_b . При моделировании полагалось, что трансформации подвергается СК КАМ-16, $h_0^2 = 100$ (10 дБ), $\lambda = 0,1$.

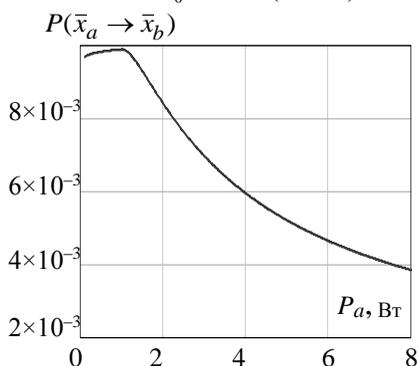


Рис. 2.5.22. Зависимость вероятности парной ошибки от значения мощности ВСС P_a

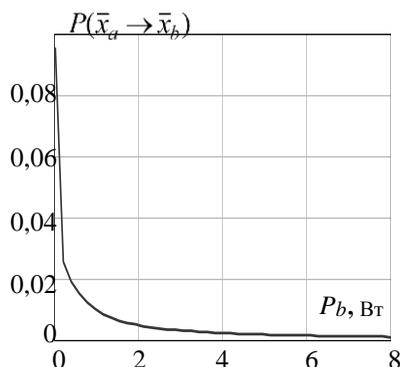


Рис. 2.5.23. Зависимость вероятности парной ошибки от значения мощности ВСС P_b

На рис. 2.5.24 представлены результаты моделирования зависимости вероятности парной ошибки от соотношения мощностей ВСС P_a и P_b (при условии: $h_0^2 = 100$, $\lambda = 0,1$).

Наихудшая вероятность парной ошибки достигается при условии равенства мощностей P_a и P_b . Вместе с тем, при выполнении условия равенства векторов обеспечивается наилучшее значение ПФ для сигнала КАМ-16.

Таким образом, трансформация сигнала КАМ-16 позволяет улучшить либо значение ПФ сигнала, либо величину вероятности парной ошибки. Парадокс выявленной закономерности позволяет заключить, что вероятность парной ошибки при определённых значениях P_a и P_b не зависит от значений величин данных мощностей (для рассматриваемой СК указанные условия наступают при $P_a > 4$ и $P_b > 4$ (см. рис. 2.5.24).

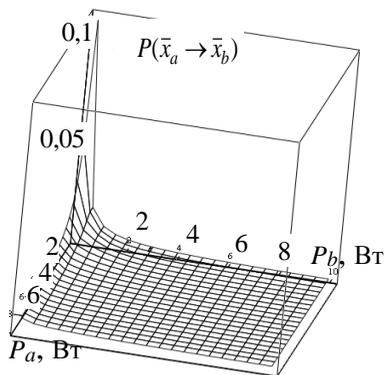


Рис. 2.5.24. Зависимость вероятности парной ошибки от взаимных значений мощностей ВСС P_a и P_b

Вместе с тем, существуют области значений мощностей P_a и P_b , где данный показатель достигает наихудшей величины (для рассматриваемой СК, указанные условия наступают при $P_a < 4$ и $P_b < 4$ (см. рис. 2.5.24).

Формирование сигнальных конструкций с большими значениями пиковых мощностей ВСС приводит к увеличению их ПФ. В качестве оценки трансформации констелляционной диаграммы СК могут рассматриваться значения ПФ и величины вероятности парной ошибки.

Полученные закономерности позволяют определить основные этапы методики, направленной на улучшение энергетических параметров сигнальных конструкций, используемых, в том числе, и для передачи видеосигналов по каналам космического ТВ:

1. Определяют точки ВСС с максимальным значением пиковой мощности и рассчитывают ПФ СК.

2. Исходя из требований к значению ПФ, вычисляют коэффициент трансформации и рассчитывают значение его произведения на величину ВСС с максимальным значением пиковой мощности.

3. Рассчитывают вероятность парной ошибки для трансформированного СК. При этом полагают, что значению P_a соответствует точка констелляционной диаграммы, определяемая ВСС после умножения его на величину коэффициента трансформации, а значению P_b – точка с МЕР по отношению к точке P_a .

4. Полученный результат сравнивается с требуемым значением вероятности парной ошибки. И, при необходимости, по требуемому значению данного параметра определяются новые значения P_a и P_b (см. рис. 2.5.24).

5. При выборе новых значений P_a и P_b необходимо исходить из того, чтобы значение показателя P_b как у исходного, так и трансформируемого СК не изменялись.

6. Определяется новая величина коэффициента трансформации с выбором наибольшего значения из P_a и P_b . Если обеспечение требуемой вероятности парной ошибки возможно при условии, что значение коэффициента трансформации будет больше единицы, то улучшить значение ПФ СК не представляется возможным.

7. Вычисляется новое значение ПФ СК.

Предусмотренный стандартом телевидения *DVB-T2* поворот констелляционных диаграмм, формируемых СК, в отличие от предложенной методики не приводит к их трансформации. Вместе с тем, предложенная методика развивает стандарт *DVB-T2*, не противореча ему, так как разработчиками *DVB-T2* не раз декларировалось, что в перспективе возможны любые изменения в используемых в стандарте модуляционных форматах, если они приведут к повышению помехоустойчивости (для этого в протоколах намеренно предусмотрены, так называемые, дополнительные поля расширения для «использования в будущем» [182]). Таким образом, не исключено, что в перспективе возможно появление в стандарте и сигнальных конструкций, методы трансформаций которых разработаны в НИИ телевидения.

Полученная аналитика и результаты моделирования позволяют констатировать следующее:

1. Любая трансформация констелляционных диаграмм СК, связанная с изменением геометрического взаимного расположения ВСС, ведёт к изменению величины МЕР и, как следствие, к изменению их помехоустойчивости.

2. Помехоустойчивость СК в разной степени зависит от величины изменений ПФ и МЕР. Именно это обстоятельство дало возможность разработать методику, позволяющую определить допустимый уровень помехоустойчивости СК для заданных граничных условий вариационного изменения указанных величин.

3. Для трансформированных СК наилучшее значение вероятности парной ошибки достигается при выполнении условия

равенства мощностей ВСС до и после операции трансформации. Но при выполнении данного условия достигается наилучшее значение помехоустойчивости по показателю ПФ.

4. Наихудшее значение показателя парной ошибки обеспечивается при отношении взаимных мощностей ВСС до и после транспонирования более четырёх раз.

Разработанная методика направлена на поиск требуемой формы транспонирования диаграммы СК на стадии их проектирования при заданных условиях. Предварительные расчёты указывают, что её применение позволяет на 8% снизить значение ПФ для сигналов КАМ-16 за счёт трансформации его конstellационной диаграммы, при изменении значения МЕР не более чем на 3%.

Вместе с тем, наука и технический прогресс определяют дальнейшее развитие методов канального кодирования, которое видится в использовании адаптивных подходов.

В рамках п. 1.19 повестки дня Всемирной конференции радиосвязи 2012 г. записано: *«Рассмотреть регламентные меры и их значение для внедрения систем радиосвязи с программируемыми параметрами и систем когнитивного радио на основе результатов исследований МСЭ-Р в соответствии с Резолюцией 956 (ВКР-07)»*. Рабочая группа 1В МСЭ-Р разработала определения систем радиосвязи с программируемыми параметрами (*SDR*) и систем когнитивного радио (*CRS*) [192]. По мнению организации это позволит провести чёткую грань между технологиями *SDR* и *CRS*. В тексте «Отчёта МСЭ-Р SM.2152» были представлены определения:

«Радиоустройство с программируемыми параметрами (*SDR*): Радиопередатчик (РПД) и/или радиоприемник (РПИМ), использующий технологию, позволяющую с помощью программного обеспечения устанавливать или изменять рабочие радиочастотные параметры, включая, в частности, диапазон частот, тип модуляции или выходную мощность, за исключением изменения рабочих параметров, используемых в ходе обычной предварительно определенной работы с предварительными установками радиоустройства, согласно той или иной спецификации или стандарта системы».

«Система когнитивного радио (*CRS*): Радиосистема, использующая технологию, позволяющую этой системе получать знания о своей среде эксплуатации и географической среде, об

установившихся правилах и о своём внутреннем состоянии; динамически и автономно корректировать свои эксплуатационные параметры и протоколы, согласно полученным знаниям, для достижения заранее поставленных целей; и учиться на основе полученных результатов».

Изначально, телевизионные системы *CRS* призваны значительно повысить эффективность использования частотного ресурса канала за счёт использования механизма динамического управления. Поскольку механизм динамического управления спектром сложен технически, то он может применяться только в так называемых интеллектуальных ТВ системах. Отличительной особенностью таких систем является способность извлекать и анализировать информацию из окружающей среды, предсказывать изменения состояние канала и оптимальным образом подстраивать свои внутренние параметры, адаптируясь к происходящим изменениям.

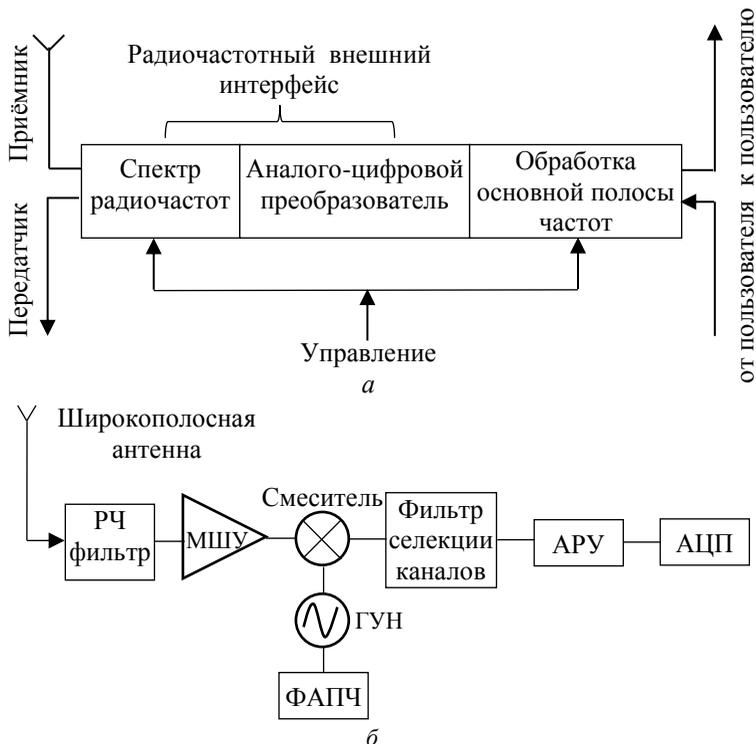
Официально впервые термин «когнитивное радио» был предложен Дж. Митолой [193] – одним из пионеров этой технологии. Её основу составляют системы радиосвязи с программируемыми параметрами (*Software Defined Radio – SDR*), которые в результате мониторинга создают свою внутреннюю базу данных о состоянии качества канала в пределах доступного частотного ресурса. В результате обеспечивается максимальное соответствие параметров формируемого сигнального трафика возможностям канала.

Таким образом, можно полагать, что свойство когнитивности (или способность к познанию и самообучению) подразумевает способность радиосистемы решать следующие задачи [194]:

- оценка уровня шума в каждом из субканалов (используемых в данный момент времени полос радиочастот);
- анализ параметров радиоканала, оценка канальной информации, предсказание состояния радиоканала;
- контроль излучаемой мощности и динамическое управление спектром.

Обобщенный принцип работы когнитивной системы с программируемыми параметрами схематически показан на рис. 2.5.25.

Согласно [194] он заключается в том, что в широкой полосе частот ведётся приём всех поступающих сигналов. Затем посредством быстродействующего АЦП формируется групповой битовый поток, поступающий в ЭВМ со специальным программным обеспечением, где по результатам обработки принимается решение.



2.5.25. Физическая архитектура когнитивного радио: приёмопередатчика – а; широкополосного радиочастотного аналогового внешнего интерфейса – б

На рис. 2.5.25 приняты сокращения: МШУ – малошумящий усилитель, ГУН – генератор управляемых напряжений, ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты, АРУ – автоматическая регулировка усиления, АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

Указанные принципы ещё в 1988 г. были разработаны во ВНИИ телевидения профессором И. И. Цуккерманом, который представил канал с регулируемыми параметрами формируемого сигнального потока, адаптивно подстраиваемого в соответствии

с частотно-энергетическим состоянием канала. Казалось бы, парадокс, но идея, рожденная на исходе 1980-х годов, была подхвачена и воплощена в жизнь в НИИ телевидения лишь через четверть века [195] в силу появления новых достижений в области цифровых методов и технологий передачи ТВ сигнала. Такая система должна обеспечивать передачу информации по каналам борт–борт и борт–Земля.

Научный прогресс в области синтеза и обработки сигналов стимулирует поиск новых решений в реализации концепций кодирования канала в интересах космического ТВ. Так, учитывая его специфику (малокадровость и частотную ограниченность каналов), можно прогнозировать, что будущее видится в применении, так называемых, узкобазисных сигналов, формируемых «в нарушение» принципа ортогональности. Такие сигналы в зарубежной литературе получили название *Non-Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (мультиплексирование с неортогональным частотным разделением каналов). Такой подход является цифровым методом модуляции, использующим множество близко расположенных (ближе чем в *OFDM*), неортогональных по частоте поднесущих. Как и в *OFDM*, в *N-OFDM* каждая поднесущая модулируется по обычной схеме модуляции (например, квадратурная амплитудная модуляция). Возможность разнесения в *N-OFDM* гармонических поднесущих как на равные промежутки, так и на разные частотные интервалы, открывает широкие возможности совершенствования кодирования канала с помощью реализации адаптивных алгоритмов формирования ТВ сигналов. При этом указанный подход полностью укладывается в концепцию основных положений теории статистического анализа и синтеза, рассмотренную в разделе 2.1.

Таким образом, *теория* космического телевидения, развиваемая в НИИ телевидения на протяжении полувека [1], [33]–[37], постоянно взаимодействуя с новыми технологиями, обосновывает синтез телевизионных систем и является важнейшей основой *практики* космического телевидения.

Глава 3. ПРАКТИКА КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

3.1. Специфика космического телевидения

Не останавливаясь на прагматических аспектах космического телевидения, приобретающего черты космономики [28], характеризуя специфику космического телевидения необходимо отметить стратегические цели космонавтики [3], [11], [38], включающие колонизацию Луны и другие крупные проекты. Этот вектор развития космонавтики усиливает внимание к надёжности и срокам активного существования космической аппаратуры. Когда говорят о том, что он для геостационарных спутников уверенно достиг уровня 15 лет [208], то имеют в виду связную аппаратуру. У космической телевизионной аппаратуры имеются важные отличительные особенности: факторы космического пространства сильнее сказываются на параметрах твёрдотельных фотоприёмников, чем на работе обычной электроники, в которой возможно, в частности, применение резервирования блоков и использование совместной обработки сигналов параллельно работающих устройств.

Важным аспектом надёжности космической техники является механическая прочность космической аппаратуры. Она требуется в основном для жёсткости, стабильности и точности оптической подсистемы в условиях термоциклирования в космосе [12], [209] и перехода от нормального атмосферного давления к вакууму, а также для сохранения целостности аппаратуры при вибрационных и ударных воздействиях в процессе вывода КА на орбиту. Для оценки устойчивости аппаратуры к воздействию тепловых и механических воздействий проводится комплекс наземных испытаний (рис. 3.1.1, 3.1.2).

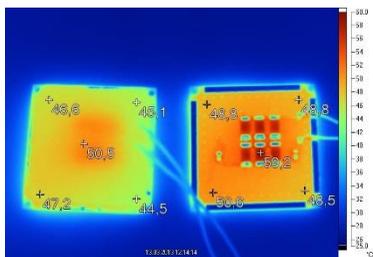


Рис. 3.1.1 Тепловые испытания компаундов вакуумной защиты



Рис. 3.1.2. Испытания на вибропрочность моноблока для скафандра

Рассматривая комплекс дестабилизирующих факторов космического пространства [24], [36], [209]–[215], [251] мы видим целый набор воздействий, различными способами влияющих на фотоприёмную аппаратуру и ведущих как к потере полезной информации, так и к возникновению ложной информации, что критически снижает качество получаемой видеоинформации.

Космические аппараты подвергаются воздействию ионизирующего излучения Солнца; на низких орбитах воздействует разреженная плазма, создаваемая атмосферой Земли; для всех КА существенным является воздействие галактического излучения.

Большая часть энергии солнечного излучения сосредоточена в видимом диапазоне. Суммарная мощность излучения Солнца в оптическом диапазоне составляет 1400 Вт/м^2 . Кроме оптического излучения от Солнца идет поток продуктов термоядерной реакции. В составе потока 90% – протоны, 7% – альфа-частицы, 1% – атомы и ионы тяжёлого гелия, 1% – электроны. Также в излучении присутствуют и гамма-кванты. Нейтронов в потоке почти нет. На Солнце происходят вспышки, так что во времени поток частиц неоднороден. Вспышки имеют регулярный характер и повторяются в среднем через 20 дней. Извержения происходят реже одного раза в год. При вспышке поток частиц возрастает в несколько тысяч раз, а при извержении – в миллионы раз. Средняя энергия протонов, излучаемых спокойным Солнцем, – $600 \dots 800 \text{ эВ}$; электронов – $0,3 \dots 0,4 \text{ эВ}$. Во время вспышек энергия частиц возрастает и достигает 50 МэВ для протонов и 5 МэВ для электронов. Во время извержений энергия частиц достигает 10^{13} эВ [215].

Если говорить о галактическом излучении, то его интенсивность очень мала и сравнима с яркостью звёзд по отношению к Солнцу (рис. 3.1.3). Состав галактического излучения: протоны, электроны, гамма-кванты и тяжёлые атомы. Это излучение постоянно во времени и однородно во всех направлениях. Свойства галактического излучения определяются его спектральным составом. В галактическом потоке присутствуют частицы с энергией до $3 \cdot 10^{21} \text{ эВ}$, что соответствует 50 Дж и эквивалентно энергии пули мелкого калибра. Плотность потока частиц с энергией больше 10^{10} эВ не превышает $3 \cdot 10^4 \text{ 1/(м}^2 \cdot \text{с)}$, а для частиц больше 10^{20} эВ – не более $10 \text{ 1/(м}^2 \cdot \text{с)}$ [215].

Противодействие воздействию радиации (накопленной дозе) во многом определяется пассивной защитой – корпусами КА и блоками аппаратуры, обеспечивающими не только механическую прочность, но и ослабление космической радиации (рис. 3.3).

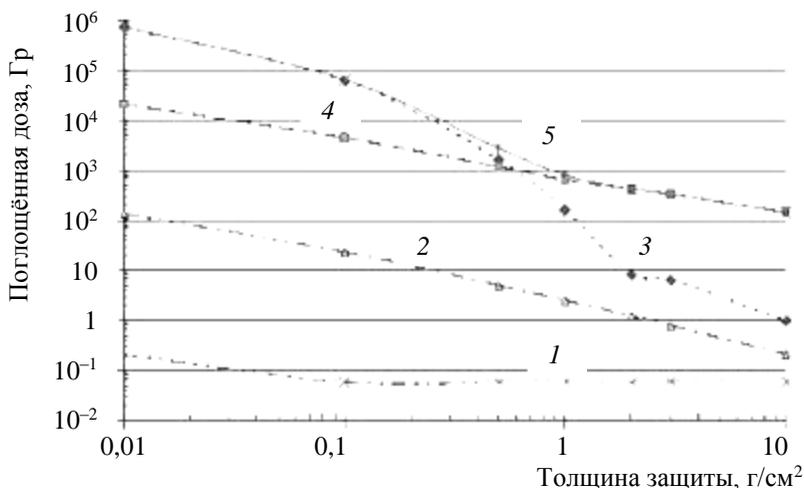


Рис. 3.1.3. Зависимость поглощённой дозы за 5 лет эксплуатации на орбите
 1 – галактические космические лучи; 2 – солнечные космические лучи;
 3 – электроны радиационных поясов Земли;
 4 – протоны радиационных поясов Земли; 5 – суммарная доза

Воздействие атмосферы Земли определяется химически активными компонентами плазмы – ионами и атомами кислорода. Плотность кислорода на орбите $10^6 \dots 10^8$ атомов/см³. Атомарный кислород разрушает полимерные покрытия и окисляет металлы. Разрушение полимерных покрытий стимулируется УФ излучением Солнца, а неорганические продукты реакции защищают поверхность полимерных слоев и тормозят дальнейшее разрушение [214].

Термоциклы [209] оказывают общее негативное воздействие на аппаратуру КА за счёт создания циклически меняющихся термомеханических напряжений в электронных приборах и элементах конструкции. Фотоприёмная аппаратура обычно выполняется в термостабилизированных корпусах, однако есть опасный процесс, вызывающий общие отказы электронной аппаратуры. Это рост нанокристаллов из оловянных сплавов на электронных платах и компонентах. Термомеханические напряжения являются основным источником энергии для роста нанокристаллов, которые прорастают сквозь изолирующие полимерные покрытия шин питания и кабелей связи и вызывают короткое замыкание проводников или становятся слабым местом для электростатического пробоя. Поэтому в бортовой аппаратуре КА всячески избегают лужения контактов и выводов, применяя покрытие свинцом или золотом.

В космосе и, в частности, на околоземной орбите присутствует много частиц твёрдого вещества – микрометеоритов. Их характерные размеры – единицы и десятки микрометров, редко превышают 100 мкм. Скорости, на которых микрометеориты сталкиваются с космическими аппаратами, достигают 70 км/с [211]. При столкновении кинетическая энергия превращается в тепловую, а вещество метеорита и участок поверхности космического аппарата испаряются и ионизируются. Эффективность ионизации зависит от скорости столкновения и оценивается средним значением 500 Кл/кг. Энергия плазмы частично преобразуется в электромагнитное излучение с шириной спектра от рентгеновского до радиочастотного с максимальной плотностью мощности в оптическом диапазоне. Попадание микрометеорита регистрируется фотоприёмной аппаратурой как яркая вспышка. На поверхности образуется кратер размером в сотни микрометров. Это особенно существенно для оптических систем, со временем значительно снижается их качество, что отрицательно сказывается и на качестве получаемой видеоинформации.

Следующим фактором являются статические электрические разряды. До 30 % отказов в работе космических аппаратов на высоких орбитах связано с их электризацией. В ионосфере Земли существует два уровня ионизирующих частиц. Нижний уровень – это поток протонов, верхний – поток электронов. Ультрафиолетовое излучение Солнца также вызывает внешний фотоэффект, т. е. излучение электронов с внешней поверхности космических аппаратов. Равномерное распределение заряда по металлической поверхности космического аппарата не опасно для электронной аппаратуры. В реальной ситуации поверхность аппарата покрыта слоем полимерного теплозащитного материала, а солнечные батареи – прозрачным экраном. Поток ионов и протонов совместно с фотоэффектом создают на освещённой поверхности положительный потенциал. На теневой стороне аппарат приобретает отрицательный потенциал. Такая разность потенциалов между элементами конструкции из различных материалов может достигать 10 кВ, что приводит к возникновению электростатических разрядов на поверхности аппарата. В результате по конструкции спутника протекают импульсные токи, которые генерируют в проводниках помехи в единицы и десятки вольт, что вызывает сбои в работе электронной аппаратуры и необратимые отказы электронных систем. Частицы с высокой энергией и вторичные нейтроны проникают внутрь корпуса и вызывают электризацию элементов конструкции электронных систем и устройств. В этом

случае электростатические разряды воздействуют непосредственно на полупроводниковые приборы электронных систем. Космические аппараты на эллиптических орбитах постоянно меняют полярность электризации, что увеличивает частоту и мощность электростатических разрядов [212], [213]. В некоторых областях околоземного космического пространства концентрация заряженных частиц такова, что эти частицы способны создавать абсолютный и дифференциальные потенциалы на поверхности и внутри космического аппарата до уровня напряжения пробоя. Заряды освобождаются и возбуждают в кабелях электромагнитные помехи. Импульсы проникают в корпус и распространяются по проводникам печатных плат, достигают активных элементов, переключают триггеры, насыщают усилители, плавят проводники в микросхемах, пробивают *p-n*-переходы и диэлектрики. Эти процессы приводят к сбоям или необратимым отказам бортовых радиоэлектронных и видеосистем. При разработке микросхем следует учитывать возможность электростатических разрядов между выводами корпуса, предусматривая соответствующие блоки защиты, а разработка оптических систем должна включать специализированное антистатическое покрытие оптических компонентов. Воздействие ионизирующего излучения на оптические стекла вызывает их окрашивание и люминесценцию. Первый эффект определяется суммарной поглощенной дозой, причем он слабо зависит от вида воздействующего излучения, а второй – мощностью дозы [213].

Радиационное окрашивание стекол объясняется накоплением в их объёме центров окраски, образующихся в результате захвата электронов и дырок структурными дефектами разных типов. В процессе воздействия ионизирующего излучения ловушки, имеющиеся в стекле и ответственные за образование центров окраски, заполняются электронами и дырками. Это приводит к росту оптической плотности образца, характеризующей суммарное поглощение света во всей его толщине. С увеличением мощности дозы равновесный уровень приращения оптической плотности стекол повышается. На радиационное окрашивание стекол большое влияние оказывают примеси. Оптические стекла без специальных добавок заметно окрашиваются при дозах $\sim 10^3$ Гр. Защитные стекла солнечных батарей, содержащие оксиды церия (0,5...1,5%), сохраняют высокую прозрачность при поглощённых дозах до 10^6 Гр. Введение оксида церия в состав стекла смещает спектр центров окраски в УФ область [216].

Анализ результатов воздействия факторов космического пространства на элементную базу электронных устройств [24]

тики фотоприёмника, включающего массив фотоприёмных пикселей и 1024 столбцовых АЦП, позволили полностью снять сомнения о тепловом воздействии интегрированных цифровых блоков на качество сигнала аналоговой фотоприёмной части схемы (рис. 3.1.5)

При разработке фотоприёмной матрицы 1205XB014 применены меры повышения стойкости к ионизирующему излучению космического пространства:

- технологические методы, основными из которых является система двойных инверсионных защитных технологических карманов, значительно снижающих возможность возникновения тиристорных эффектов, использование специальных библиотек топологических элементов, имеющих увеличенные защитные интервалы и со скругленными углами активных структур для уменьшения напряженности электрических полей, а также использование эпитаксиальных пластин;

- схемотехнические методы, среди которых основными являются схемы мажорирования, блоки контроля тока потребления и схемы сброса питания при возникновении тиристорного эффекта, схемы компенсации изменения пороговых напряжений МОП транзисторов, а также формирователи сигнала для восстановления формы передаваемых импульсов;

- системные методы (использование методов кодовой защиты).

Стойкость матриц к общей накопленной дозе проверялась на кобальтовом источнике высокой интенсивности. Фотоприёмники не меняют ток потребления до 150 кРад, визуальное качество изображения не изменяется до 300 кРад, катастрофический отказ не зафиксирован до 450 кРад.

Стойкость к тяжелым заряженным частицам (протоны) характеризуется отсутствием сбоев до 68 МэВ мг/см² (замечены однокадровые события); матрицы работоспособны до 90 МэВ мг/см² (на поле фотоприёмника появились единичные белые точки).

Испытания на радиационную стойкость космической аппаратуры обычно проводятся при воздействии протонов (рис. 3.1.6), и лишь при предварительных испытаниях элементной базы проводят проверку её устойчивости также и к тяжёлым заряженным частицам.

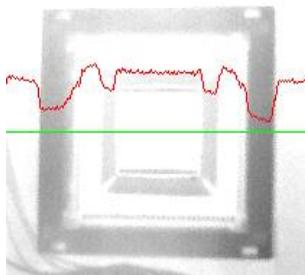


Рис. 3.1.5. Распределение температуры по фотоприёмной матрице в стационарном режиме

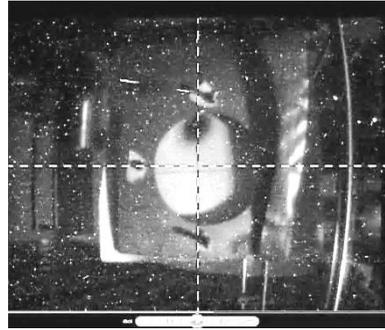
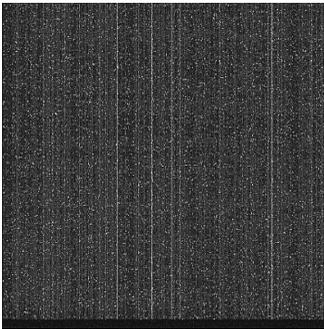
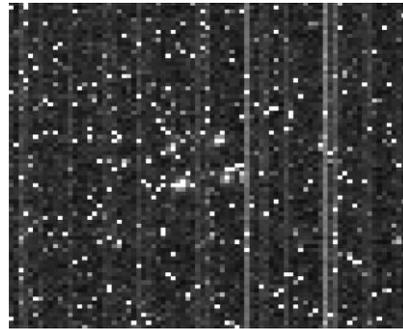


Рис. 3.1.6. Испытания ТВ камеры на ускорителе в ПИЯФ РАН на воздействие потока протонов и изображение с однокадровыми сигналами

Радиация вызывает в фотоприёмниках возникновение ложных сигналов, главные из которых – пикселы с аномально большим темновым сигналом («горячие» пикселы) и однокадровые сигналы. Аномально большие темновые сигналы бывают двух видов – точечные дефекты и «столбы» (рис. 3.1.6) [217]. «Столбцовые» радиационные дефекты более типичны для матричных ПЗС, но встречаются и в КМОП-матрицах. Однокадровые события из-за радиации в основном имеют вид точечных объектов, но могут иметь вид и протяжённых треков (рис. 3.1.7, 3.1.8). Повышение качества информации при воздействии радиации достигается межкадровой обработкой видеосигнала. При этом в системах наблюдения сложных сюжетов требуется периодическое запоминание темновых сигналов с перекрытием света шторкой.



а



б

Рис. 3.1.7. Темновой сигнал после воздействия облучения протонами с энергией 1 ГэВ при дозе, эквивалентной 8 годам эксплуатации ТВ камеры в космосе: матрица 1 мегапиксел – *а*;
фрагмент матрицы с сигналом тестового объекта – *б*

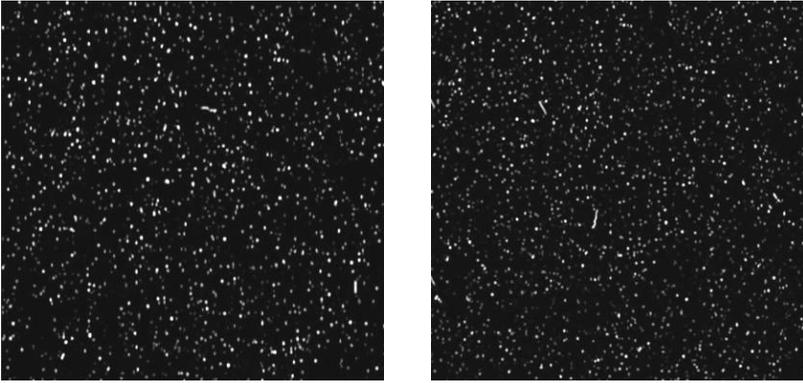


Рис. 3.1.8. Однокадровые события (точечные и треки) на фоне темнового сигнала во время облучения протонами с энергией 1 ГэВ, ориентировочная плотность потока $10^7 \dots 10^8$ протонов/см²·с, два соседних по времени кадра (фрагмент матрицы)

В астродатчиках имеется возможность подавления темновых сигналов без перекрытия светового потока. Алгоритм подавления ложной информации из-за однокадровых событий при видимой скорости звёзд менее пиксела за кадр может иметь простой вид нелинейного фильтра, имеющего нулевую импульсную характеристику и неискажённую переходную характеристику [217]:

$$Y_{i-1} = \min\{S_{i-1}, \max\{S_i, S_{i+1}\}\}. \quad (3.1.1)$$

Эффективность алгоритма (3.1.1) иллюстрируется рис. 3.1.9, 3.1.10: постоянные дефекты сохраняются, однокадровые подавляются. При видимых скоростях звёзд, заметно больших пиксела за кадр, селекция сигналов звёзд на фоне радиационных сигналов включает внутрикадровую обработку. Алгоритм подавления ложной информации из-за стационарных дефектов в астродатчиках (рис. 3.1.11) может иметь вид нелинейного фильтра, имеющего единичную импульсную характеристику и переходную характеристику, единичную в интервале группы k кадров, достаточную для смещения изображения звёздного поля до полного несовпадения сигналов звёзд в поле зрения (порядка 10^3 кадров или 1...2 мин). Для снижения коэффициента шума такого режекторного фильтра сравниваемые сигналы оценки фона усредняются по группе n кадров (порядка 8–16 кадров) [217]:

$$Z_i = S_i - \min\left\{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{-n} S_i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{-n} S_{i-k}\right\}. \quad (3.1.2)$$

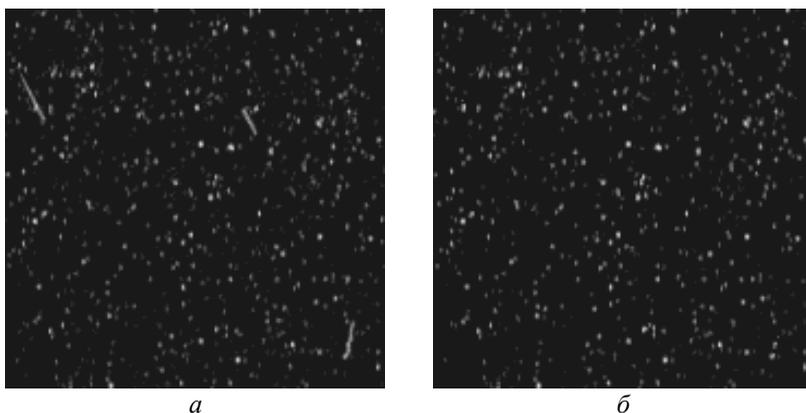


Рис. 3.1.9. Два соседних кадра: один из группы анализируемых алгоритмом (3.1.1) – *a*; выходной сигнал алгоритма – *б*

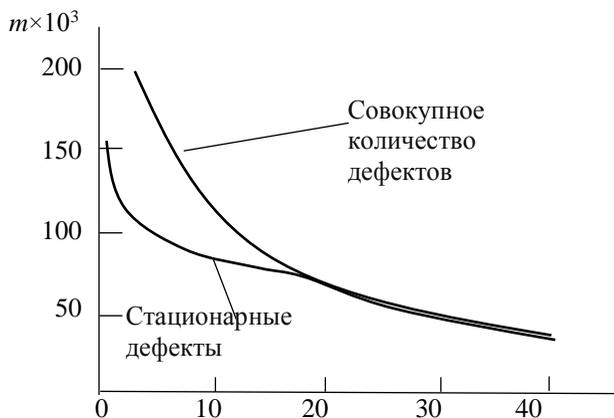


Рис. 3.1.10. Зависимость количества ложных сигналов от порога

Вместе с тем первичная обработка видеосигнала для подавления столбцовых ложных сигналов (3.1.2) может быть реализована достаточно простыми средствами, в том числе в виде видеосистемы на кристалле, в которой вычислительная подсистема связана с фотоприёмным массивом множеством параллельных каналов аналогично известному принципу [218]–[220], используемому при кодировании изображений (см. рис. 3.1.10).

Реализация алгоритма последовательного подавления столбцовых, точечных постоянных и однокадровых ложных сигналов [217] позволяет повысить качество информации при выделении сигналов звёзд в астродатчике (рис. 3.1.12).

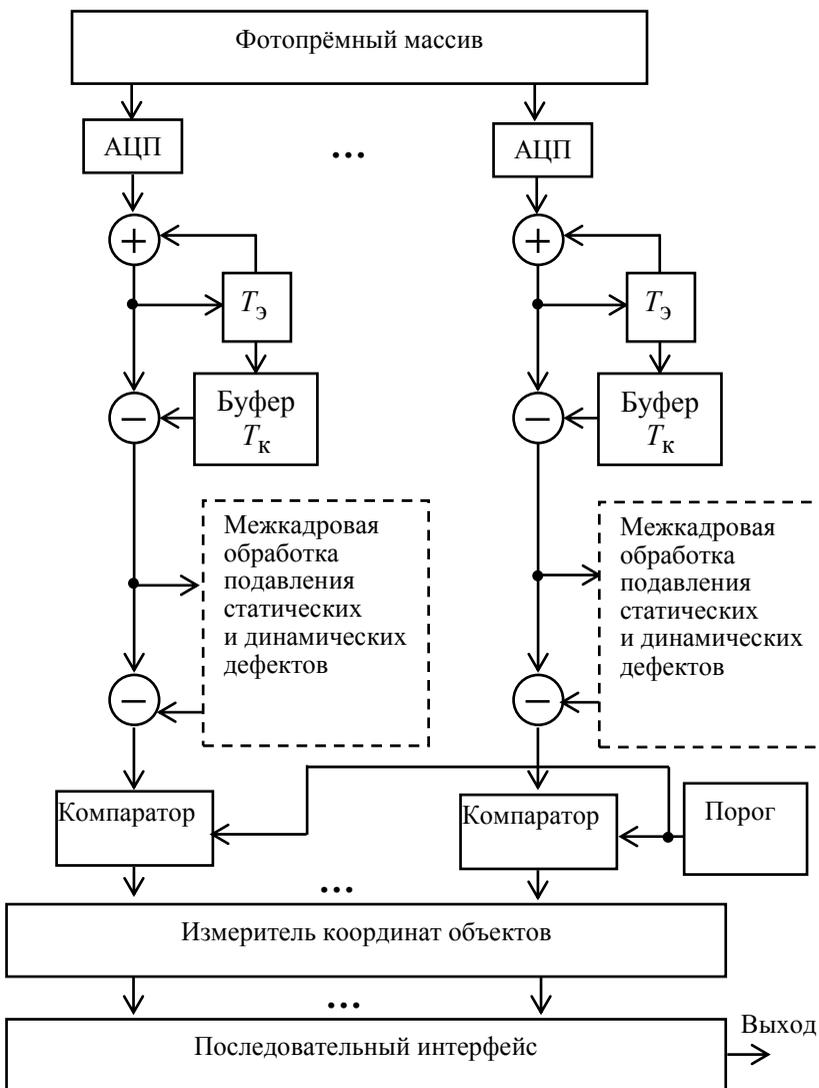


Рис. 3.1.11. Структурная схема видеосистемы на кристалле с параллельной обработкой сигнала; подавление возникающих постоянных дефектов и однокадровых сигналов выполняется на отдельном кристалле

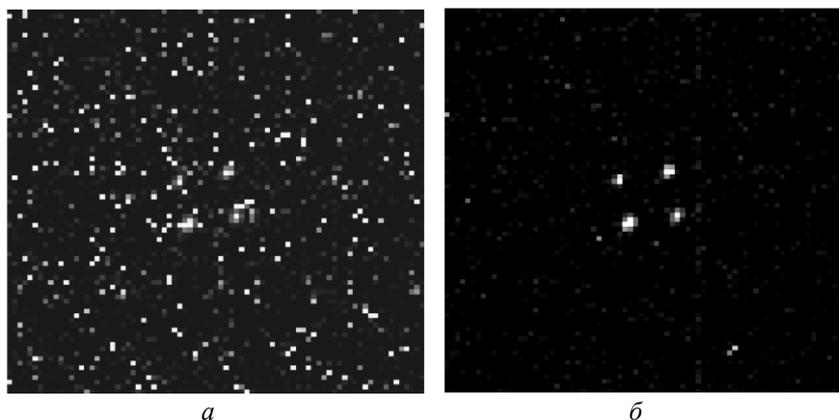


Рис. 3.1.12. Тестовый сигнал на фоне стационарных радиационных помех: после подавления столбцовых дефектов с помощью метода (3.2) – *а*;
 после подавления стационарных точечных дефектов межкадровой обработкой – *б*

Важной особенностью космического телевидения с точки зрения воздействия радиации является построение цветных и многоспектральных систем с помощью оптических фильтров, не использующих типичную для наземных систем структуру пространственных фильтров Байера в силу их сильной деградации при воздействии космического излучения [36]. Подробнее о радиационно-стойких фотоприёмных матрицах с разделением сигналов по длине волны оптического излучения см. раздел 4.3.

Контроль за функционированием бортовых телевизионных систем обеспечивается телеметрией, позволяющей, в частности, обеспечивать её тепловые режимы в заданном диапазоне.

Каждая космическая аппаратура в процессе разработки подвергается многочисленным испытаниям (отмеченные выше стойкость к космической радиации, механическая прочность, термовакуумные испытания, испытания на электромагнитную совместимость и надёжность и т. п.) согласно индивидуальным Программам обеспечения надёжности и Комплексным программам экспериментальной отработки. Для большинства телевизионных комплексов космического назначения создаётся специальная контрольно-проверочная аппаратура (рис. 3.1.13, 3.1.14).

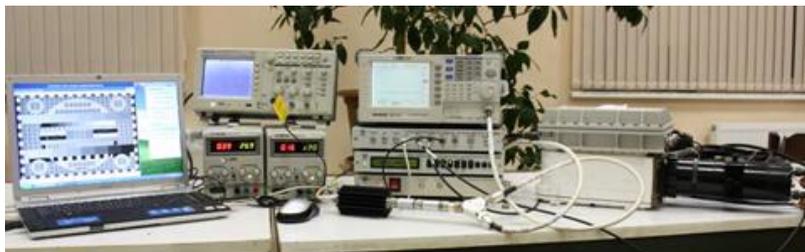


Рис. 3.1.13. Тестирование телевизионной системы контроля стыковки космических аппаратов с помощью контрольно-поверочной аппаратуры, изготовленной НИИ телевидения по заказу НАСА



Рис. 3.1.14. Тестирование телевизионной камеры с помощью имитатора звёздного неба ИЗН (разработки КМЗ им. Зверева)

Изложенное в этом разделе показывает, что синтез систем космического телевидения предполагает не только рассмотренные в гл. 2 ограничения на оптимизируемые параметры, относящиеся к информационным показателям, но и ряд технологических ограничений, которые призваны обеспечить высокую надёжность системы в условиях воздействия широкой группы факторов космического пространства. Наиболее сильно этот класс ограничений сказывается при проектировании электронной компонентной базы, для которой созданы специальные средства автоматизированного проектирования радиационно-стойких интегральных схем [5]–[7], [24], [36].

3.2. Космические ТВ камеры

Современные космические ТВ камеры (в отличие от рассмотренных в разделе 1.2, [1]), уже выполненные на основе твёрдых фотоприёмников [35], [36], подразделяются на несколько подклассов:

- по условиям эксплуатации (температура, давление, радиационная защита) – внутриотсечные (рис. 3.2.1.) и забортные (рис. 3.2.2–3.2.5);
- по типу развёртки – кадровые, строчные, с режимом временной задержки и накопления, одноэлементные;
- по технологии фотоприёмника – на КМОП или ПЗС;
- по разрешающей способности – стандартной (рис. 3.2.2–3.2.3), высокой (рис. 3.2.6, 3.2.7) и сверхвысокой чёткости (рис. 3.2.4);
- по типу оптической системы – узкоугольные (рис. 3.2.5) и широкоугольные (рис. 3.2.4, в т. ч. панорамные);
- по спектральным диапазонам – монохромные видимого, ближнего ИК (рис. 3.2.2–3.2.4, 3.2.7) и ближнего УФ (рис. 3.2.5) диапазонов, цветные (рис. 3.2.1), многоспектральные;
- по типу получателя – для визуального наблюдения (рис. 3.2.2–3.2.5) и для автоматического получателя (астродатчики – рис. 3.2.6, роботы и т. п.);
- с использованием резервирования каналов (рис. 3.2.2, 3.2.3) и без резервирования (рис. 3.2.1, 3.2.4–3.2.7);
- с единственным оптической системой или с несколькими одинаковыми углами зрения (в том числе стереосистемы) или с различными углами зрения для реализации итерационного принципа С. П. Королёва, используемого при контроле сближения КА (см. разделы 1.2, 2.3, 3.3, 3.4).

Характеристики камеры КЛ-152М

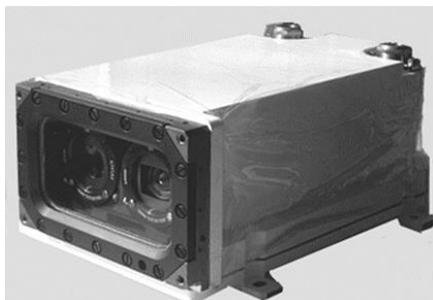


Рис. 3.2.1.

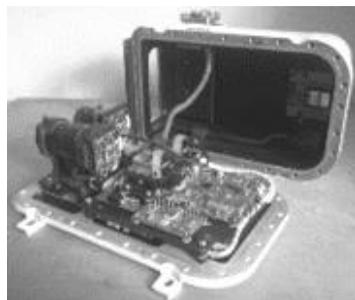
Камера КЛ-152М

Формат $H \times V$, эл.	628×586
Угол поля зрения $H \times V$, град	64×50
Габаритные размеры, мм	129×52×105
Масса, кг, не более	0,5
Напряжение питания, В	27 ⁺⁷ ₋₄
Потребляемая мощность, Вт	1,1
Диапазон освещённости, лк	50...1000
Орбита	МКС
Исполнение	негерметичное
Температура среды, град	от 0 до +40
Гарантийный срок, лет	7

Конструкция большинства забортных ТВ камер имеет развитую поверхность привалочной плоскости для обеспечения требуемого теплообмена ТВ камеры с корпусом КА. Многие забортные ТВ камеры имеют несколько объективов для обеспечения резервирования и различных углов зрения, например, КЛ-153, КЛ-154, КЛ-155. В частности, ТВ камеры КЛ-153 и КЛ-155 имеют идентичный внешний вид, но построены на разных фотоприёмных матрицах (рис. 3.2.2).



а



б

Рис. 3.2.2. Телевизионные камеры КЛ-153 – *а*; КЛ-155 – *б*

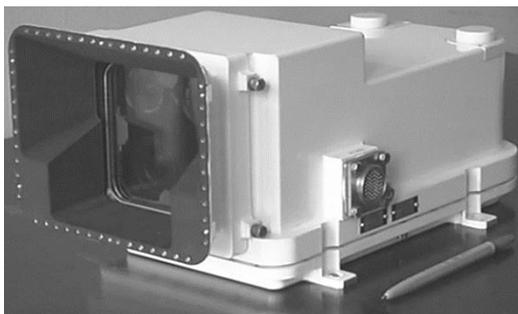
Характеристики телевизионной камеры КЛ-153М-1

Формат $H \times V$, эл.	752×582
Размер элемента, мкм	6,5×6,25
Частота кадров, Гц	25
Интерфейс видеоданных	Полный ч/б ТВ сигнал
Разрешающая способность, твл	550
Угол поля зрения $H \times V$, град	13,5×10,5 ; 64×50
Габаритные размеры, мм	340×209×128
Масса, кг, не более	5
Потребляемая мощность, Вт, не более	10
Напряжение питания, В	27 ⁺⁷ ₋₄
Диапазон освещённости, лк	50...130 000
Исполнение	герметичное
Температура окружающей среды, град	от -10 до +40

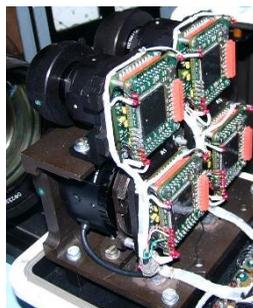
Характеристики ТВ камеры КЛ-155

Формат $H \times V$, эл.	1000×1000
Размер элемента, мкм	15×15
Частота кадров, Гц	25
Интерфейс видеоданных	Полный ч/б ТВ сигнал

Разрешающая способность, твл	550
Угол поля зрения $H \times V$, град	13,5×10,5; 64×50
Габаритные размеры, мм	340×218×128
Масса, кг, не более	5
Потребляемая мощность, Вт, не более	10
Напряжение питания, В	27 ⁺⁷ ₋₄
Диапазон освещенности, лк	50...130 000
Орбита	МКС
Исполнение	герметичное
Температура окружающей среды, град	от -10 до +40



а



б

Рис. 3.2.3. ТВ камера КЛ-154М на матричных КМОП фотоприёмниках – *а*; её узел фотоприёмников – *б*

Характеристики ТВ камеры КЛ-154М

Формат $H \times V$, эл.	1000×1000
Размер элемента, мкм	15×15
Частота кадров, Гц	25
Интерфейс видеоданных	Полный ч/б ТВ сигнал
Разрешающая способность, твл	550
Угол поля зрения $H \times V$, град	13,5×10,5; 64×50
Габаритные размеры, мм	375×206×169,5
Масса, кг, не более	9
Потребляемая мощность, Вт, не более	15
Напряжение питания, В	27 ⁺⁷ ₋₄
Диапазон освещённости, лк	500...130 000
Орбита	МКС
Исполнение	герметичное
Температура среды, град	от -10 до +40
Наличие подогрева	да
Гарантийный срок, лет	7

ТВ камера внешнего обзора НМ-101 предназначена для контроля состояния и функционирования крупных КА класса МКС и имеет весьма широкий угол обзора при малых геометрических искажениях, обеспечиваемых использованием ортоскопического объектива (на рис. 3.16 объектив закрыт технологической крышкой).

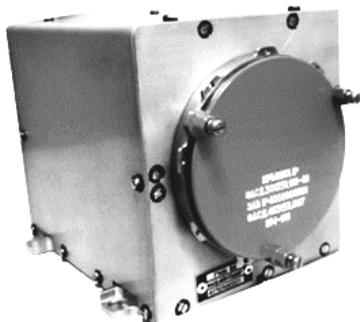


Рис. 3.2.4. ТВ камера НМ-101

Характеристики камеры НМ-101

Формат $H \times V$, эл.	4096×4096
Размер элемента, мкм	4,5×4,5
Частота кадров, Гц	10
Интерфейс видеоданных	<i>M-LVDS</i>
Угол поля зрения $H \times V$, град	87×87
Габаритные размеры, мм	156×127,5×122
Масса, кг, не более	1,2
Потребляемая мощность, Вт, не более	15
Напряжение питания, В	11...17
Диапазон освещённости, лк	50...130000
Исполнение	Негерметичное
Температура среды, град	от -50 до +50

Забортные герметичные ТВ камеры КТ-277 и КТ-278 имеют почти одинаковые конструктивные параметры, незначительно отличающиеся в части формата матрицы ПЗС и угла зрения объектива. Их главное отличие – спектральный диапазон чувствительности: ТВ камера КТ-277 чувствительна в диапазоне 0,4...1,0 мкм (видимый и ближний ИК диапазоны), КТ-278 – чувствительна в ближнем УФ диапазоне (0,25...0,4 мкм); в последней применён интерференционный отрезающий светофильтр с подавлением видимого излучения не менее чем в 10^3 раз.

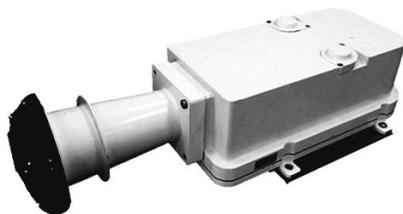


Рис. 3.2.5. Телевизионная камера КТ-278

Характеристики ТВ камеры КТ-278

Формат $H \times V$, эл.	742×576
Размер элемента, мкм	11,6×11,2
Частота кадров, Гц	25
Интерфейс видеоданных	Полный ч/б ТВ сигнал
Угол поля зрения $H \times V$, град	6×5
Угол отстройки Солнца, град	30
Габаритные размеры, мм	478×194×120,5
Масса, кг, не более	5,5
Потребляемая мощность, Вт, не более	15
Напряжение питания, В, не более	27 ⁺⁷ ₋₄
Спектральные диапазоны, мкм	0,25...0,4
Исполнение	герметичное
Температура окружающей среды, град	от +5 до +40
Наличие подогрева	да
Гарантийный срок, лет	3
Формат $H \times V$, эл.	742×576
Размер элемента, мкм	11,6×11,2

Схемотехника космических телевизионных камер при большом разнообразии конструкций имеет много общих черт, которые могут быть рассмотрены на примере ТВ камеры для малогабаритного звёздного датчика [88]. Рассматриваемый датчик отличается от множества других минимальными габаритными размерами (не более 64×58×58 мм без бленды, 64×58×161 мм с блендой), массой не более 300 г и потребляемой мощностью не более 2 Вт. Функционально звёздный датчик вычисляет светимости звёзд вплоть до 6^m и их координаты с точностью до десятых долей пиксела и передаёт полученные данные в спецпроцессор, содержащий звёздный каталог. Ограничения габаритных размеров и стоимости астродатчика определяют выбор элементной базы; в нём применены фотоприёмник – матричный ПЗС фирмы *TrueSense Imaging Inc.* типа *KAI-01050-ABA-FD-BA* и элементная база фирм *Altera*, *Analog Devices*, *Cypress*, *Linear Technology*. Одним из преимуществ данного фотоприёмника является то, что он выпускается в малогабаритном и легком корпусе типа *CLCC*. Число пикселов фотоприёмника 1024×1024 при размере пиксела 5,5×5,5 мкм². Для реализации требуемого угла обзора 15°×15° выбран объектив фирмы *Pentax* типа *C2514M* с фокусным расстоянием 25 мм и относительным отверстием 1:1,4, предназначенный для работы с фотоприёмниками, имеющими оптический формат 2/3 дюйма (заявленная изготовителем разрешающая способность

объектива не менее 130 опт. лин./мм в центре изображения). Меньшие размеры светочувствительной области ПЗС ($5,6 \times 5,6 \text{ мм}^2$), позволяют уменьшить дисторсию на краях поля зрения.

Функциональная схема ТВ камеры представлена на рис. 3.2.8. В блоке горизонтальных драйверов (ГД) формируются импульсы управления выходным регистром и плавающей диффузионной областью – *H1*, *H2*, *HL* и *RG*. В блоке вертикальных драйверов (ВД) формируются подаваемые на матричный ПЗС импульсы управления вертикальными регистрами (*V1–V4*). Вертикальный тайминг-генератор (ВТГ), сформированный в ПЛИС, формирует импульсы логических уровней *XV1–XV4*, предназначенные для формирования в ВД импульсов управления вертикальными регистрами. Горизонтальный тайминг-генератор (ГТГ) формирует импульсы логических уровней *XH1*, *XH2*, *XHL*, *XRG*, предназначенные для формирования в ГД импульсов управления горизонтальным регистром и выходным устройством с плавающей диффузионной областью. Помимо этого, ВТГ формирует строчный (*HD*) и кадровый (*VD*) синхроимпульсы, подаваемые на ГТГ для определения начала строки и кадра. Как ВТГ, так и ГТГ тактируются частотой $f_{clk} = 10 \text{ МГц}$, вырабатываемой задающим генератором (ЗГ), частота которого стабилизирована кварцевым резонатором.

Видеосигнал обрабатывается схемой двойной коррелированной выборки (ДКВ), управляемой импульсами от ГТГ *SHP* и *SHD*. Схема ДКВ устраняет шум сброса, фликкер-шум, уменьшает тактовую наводку, снижает внешние низкочастотные наводки, восстанавливает постоянную составляющую и осуществляет инверсию сигнала. Обработанный схемой ДКВ видеосигнал поступает на управляемый усилитель (УУ), коэффициент усиления которого может изменяться в широких пределах.

Схема фиксации (СФ) осуществляет фиксацию уровня чёрного для аналого-цифрового преобразования. Фиксация уровня чёрного проводится по защищённым от света пикселям в начале каждой строки (так называемые *Optical Black* пиксели). Управляющий сигнал *CLPOB* подаётся на СФ с ГТГ.

Подготовленный видеосигнал поступает на вход 14-ти разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), работающего на частоте *ADCLK*, равной 10 МГц. Цифровые 14-ти битные данные поступают на спецпроцессор (СПРЦ), в котором происходит вычисление координат центров тяжести звёзд, оценка их звёздных величин и общего количества в кадре. Обработанные данные через модуль интерфейса (МИ) передаются сигналами *LVDS* по интерфейсу

SPI во внешнее устройство с тактовой частотой 10 МГц в соответствии с протоколом информационного обмена. Частота обновления данных о координатах, светимостях и числе звёзд обновляется с частотой кадров 8 Гц. По этому же интерфейсу передается 8-битное изображение каждого тридцать третьего кадра, по 32 строки в течение каждого кадра с частотой 8 Гц. Для осуществления такой передачи СПРЦ записывает каждый тридцать третий кадр объёмом 1 Мбайт в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), из которого оно считывается в течение последующих 32 кадров.

Конструктивно электроника ТВ камеры звёздного датчика (рис. 3.2.9) выполнена на трёх печатных платах, имеющих габариты 42×42 мм и распложенных последовательно друг за другом. Минимизация объёма, занимаемого электроникой, позволила при заданной общей массе звёздного датчика увеличить толщину алюминиевого корпуса до 7 мм, что обеспечило радиационную стойкость ТВ камеры при эксплуатации на орбите в течение не менее 2 лет. В ТВ камере применена цилиндрическая бленда с двумя внутренними кольцами, гарантирующая угол отстройки от Солнца, Луны и Земли 30°.

Для контроля параметров ТВ камеры при проведении автономных и комплексных испытаний была разработана контрольно-проверочная аппаратура (КПА), обеспечивающая:

- формирование на матричном ПЗС изображения световых пятен, имитирующих изображения звёзд;
- приём информации, переданной по протоколу *SPI* о координатах звёзд и их светимостях, а также изображения звёздного неба с дальнейшим отображением на видеомониторе персонального компьютера;
- архивацию полученных изображений.

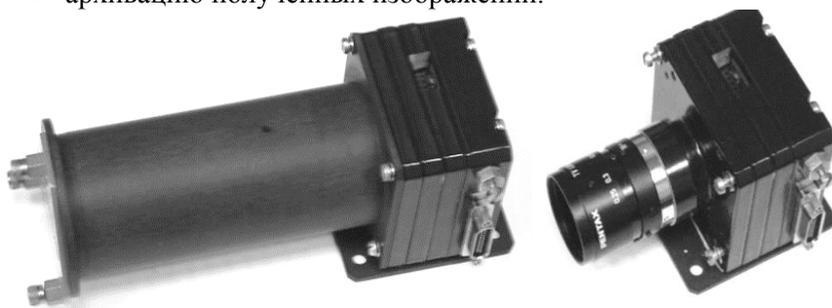


Рис. 3.2.9. ТВ камера звёздного датчика с блендой и без бленды

Характеристики ТВ камеры звёздного датчика

Разрешаемая звёздная величина, не хуже	6 ^m
Частота кадров, Гц	8
Число одновременно обрабатываемых звёзд, не менее	170
Число пикселей фотоприёмника	1024×1024
Размер пиксела, мкм ²	5,5×5,5
Фокусное расстояние объектива, мм	25
Относительное отверстие объектива	1:1,4
Напряжение питания, В	+5
Потребляемая мощность, не более, Вт	2,0
Масса, не более, г	300
Интерфейс передачи данных	<i>LVDS SPI</i>

На этапе автономных испытаний ТВ камеры звёздного датчика проводились измерения световых характеристик по протяженным и точечным объектам (рис. 3.2.10) и по звёздному небу.

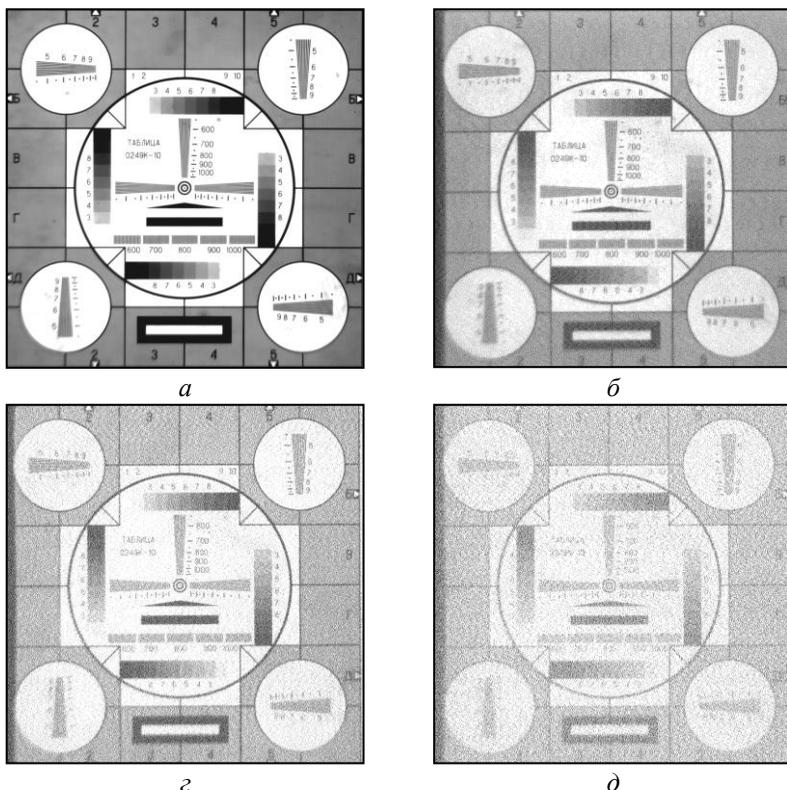


Рис. 3.2.10. Примеры изображений, формируемых ТВ камерой звёздного датчика при лабораторных испытаниях

На рис. 3.2.10 *а* приведено изображение, полученное при освещённости 5 лк. Разрешающая способность составила 1000 твл как по вертикали, так и по горизонтали. На рис. 3.2.10 *б* приведено изображение, полученное при включении аналогового усиления видеосигнала +42 дБ с соответствующим ослаблением светового потока. Разрешающая способность в обоих направлениях при этом составила 600 твл. Дальнейшее усиление видеосигнала осуществлялось цифровым методом. На рис. 3.2.10 *в* приведено изображение при эквивалентном усилении 54 дБ, а на рис. 3.2.10 *г* – 78 дБ, что соответствует усилению в 8000 раз. На рис. 3.2.10 *г* отношение сигнал/шум составляет 0,5, а уровень белого в видеосигнале равен 4...6 электронам.

Натурные наземные испытания (рис. 3.2.11, 3.2.12) подтвердили высокую чувствительность звёздного датчика даже в условиях наличия ослабления светового потока звёзд атмосферой и умеренной фоновой засветки.

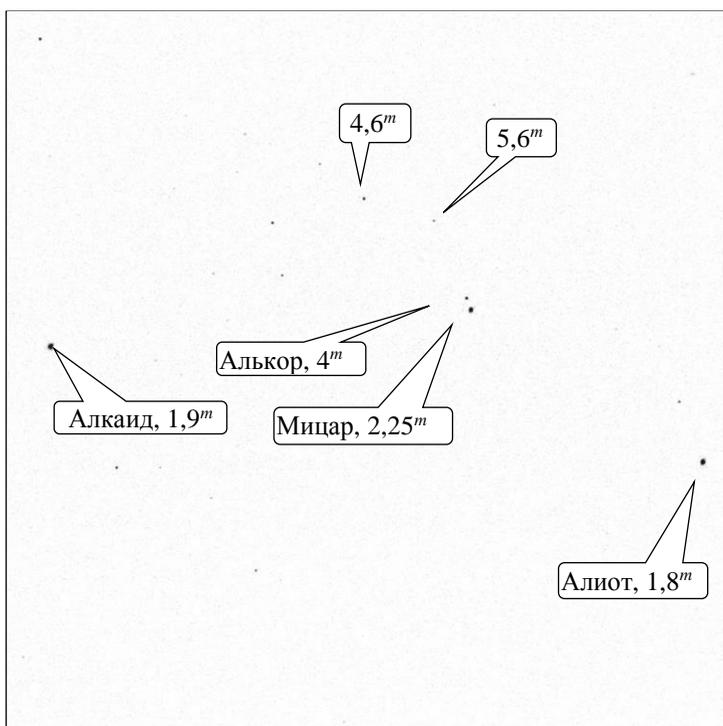


Рис. 3.2.11. Изображение участка звёздного неба (часть созвездия Большой Медведицы, негатив)



Рис. 3.2.12. Натурные наземные испытания астродатчика

Наземные испытания телевизионных камер космического назначения при оценке их световых характеристик имеют целью определение не только чувствительности, но и фоноустойчивости, актуальной в сложных условиях наблюдения (рис. 3.2.13). Для парирования искажений изображения ряда автоматических регулировок оказывается недостаточно, и параметры видеотракта, напр., при контроле сближения КА, регулируются в интерактивном режиме (рис. 3.2.14).

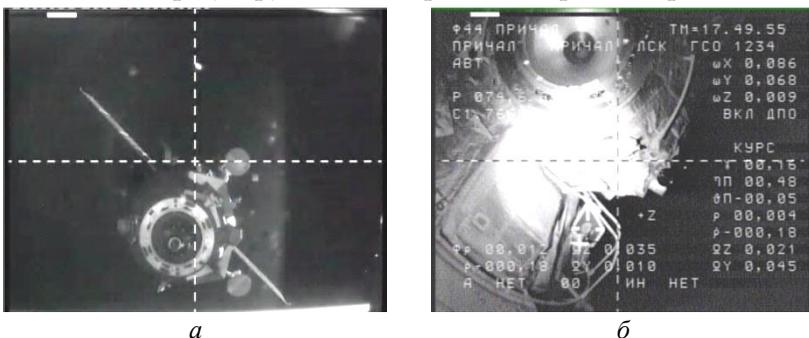


Рис. 3.2.13. Сложные световые условия наблюдения: бликовая ситуация – а; неравномерность подсветки – б

C:\Users\SEMEN\Десктоп\АРМ_КП-153М\FP153_8.exe

ПРОГРАММА ПРОВЕРКИ И УСТАНОВКИ РЕЖИМОВ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ФП-153М				
РЕЖИМ ПЕРЕСВЕТКИ ФП-153М				
	РЕЖ 1	РЕЖ 2	РЕЖ 3	ВЫКЛ
ГАММА-КОРРЕКЦИЯ	1	1	1	1
% БЕЛОГО <ПИК-СР>	3.9%	3.9%	1.94%	0.01%
РЕЖИМ ЗАТВОРА	Огр 2мс	Огр 1мс	Огр 1мс	Огр 1мс
МЕТКИ РЕЖИМОВ	ЕСТЬ	ЕСТЬ	ЕСТЬ	ЕСТЬ
ШИРОКИЙ УГОЛ	ШУ	ШУ	УУ	ШУ
РАЗМАН ВХОДНОГО ВИДЕОСИГНАЛА	004			63

Рис. 3.2.14. Параметры режимов видеотракта, переключаемых оператором

Важным аспектом фоноустойчивости космических ТВ камер является требование формирования видеосигнала при условии попадания в поле зрения изображения Солнца (рис. 3.2.15). Артефакты, возникающие при попадании Солнца в поле зрения ТВ камеры, имеют различную интенсивность в зависимости от используемых нейтральных или спектральных светофильтров, и различны в матричных фотоприёмниках ПЗС и КМОП. В ПЗС эти искажения имеют вид растекания зарядов (белые «столбы»), в КМОП – провал на изображении солнца до уровня чёрного.

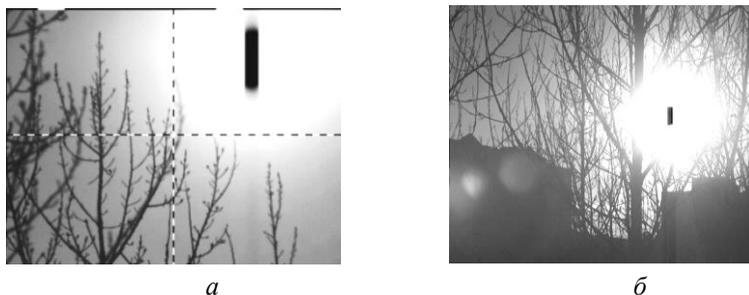


Рис. 3.2.15. Искажения изображения при попадании Солнца в поле зрения ТВ камеры на КМОП фотоприёмной матрице: узкоугольной – *а*; широкоугольной – *б*

Развитие схемотехники космических ТВ камер ведётся в направлениях:

- уменьшения габаритов;
- увеличения динамического диапазона;
- использования формата 1920×1080 и более (рис. 3.2.4, 3.2.16);
- использования фотоприёмных матриц со столбцовыми АЦП и с несколькими выходами для повышения кадровой частоты при формате не менее 1 Мегапиксела (рис. 3.2.17, [218]).



Рис. 3.2.16. Макетный образец ТВ камеры на ПЗС матрице формата 1920×1080

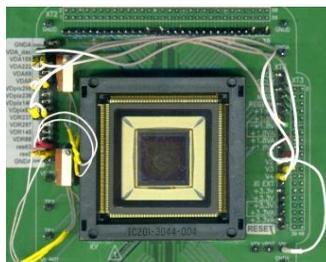


Рис. 3.2.17. Макетный образец ТВ камеры на КМОП матрице 1205XB014 формата 1024×1024

3.3. Кодеры видеoinформации, формируемой системами космического телевидения

В 2005–2006 гг. была произведена разработка, изготовление, испытания и поставка «РКК «Энергия» по заказу Европейского космического агентства (*European Space Agency*) кодера *MPEG-2* КЛ-211. Официальное название блока – кодер *MPEG2 EKA (ESA MPEG2 Encoder)*. Иногда в документах использовалось название *ESA Hardware Encoder* (в отличие от *Software encoder*).

Назначение кодера в составе системы передачи видео – обеспечение визуального контроля наземными службами за процессом причаливания европейских грузовых кораблей серии *ATV (Automated Transfer Vehicle* – автоматический грузовой космический корабль – АГК).

Основные характеристики кодера:

- скорость потока сжатого видео не более 4 Мбит/с;
- формат изображения 720×576 частота кадров/полей 25/50 Гц. Изображение чёрно-белое; поддержка цветного изображения с форматом субдискретизации цвета 4:2:0;
- стандарт кодирования *MPEG-2*;
- формат группы совместно обрабатываемых кадров *IPPP*;
- выходной транспортный поток *MPEG-2*, инкапсулированный в *Ethernet/IP/UDP* пакеты;
- срок службы 7 лет.

Кодер ЕКА обеспечивает сжатие изображения, формируемое камерами контроля сближения КЛ-143 и КЛ-145 с наложенной телеметрической информацией.

Так как причаливание кораблей *ATV* могло проводиться и над территорией, не покрываемой Российскими наземными терминалами, то выходной *Ethernet*-поток передавался в локальную сеть американского сегмента МКС, а затем совместно с другими данными (суммарно более 40 Мбит/с) на модулятор-передатчик, который транслировал поток на геостационарный спутник, входящий в состав геостационарной космической сети *NASA*. Наземные станции США транслировали принятый сигнал в наземную локальную сеть *NASA* (в Хьюстоне), где он маршрутизировался и через трансатлантическую волоконную связь поступал в Европу, где обрабатывался и далее транслировался в ЦУП, г. Королёв. Суммарная задержка всего тракта не превышает 3 секунд. Поэтому на задержку в обработке видео кодером-декодером в этом «бюджете линии» отводилось не более 0,5...1 секунды.

При разработке использованы заделы НИИТ, реализованные в различных модификациях опытных образцов кодера *MPEG-2* в работах 1998–2004 гг. (рис. 3.3.1), и приняты меры по повышению надёжности их работы.



Рис. 3.3.1. Опытный образец кодера *MPEG-2*

С этой целью в состав блока КЛ-211 были включены три идентичных кодера, работающих в горячем резерве, и узел коммутации, обеспечивающий постоянный контроль работы этих кодеров и переключение при необходимости на исправный. Поскольку кодеры выдавали не идентичный поток (он зависел от начальных состояний и времени включения генераторов), то простое мажорирование не дало бы эффекта, поэтому алгоритм анализа и переключения тестировал:

- корректность транспортного потока (*Ethernet*-потока) от каждого кодера (непрерывный анализ);
- совпадение прошивок ПЛИС (программируемых логических интегральных схем) кодеров с опорной прошивкой (анализ один раз в 10 секунд);
- наличие или кратковременное пропадание питания каждого кодера (при невыполнении первых двух тестов).

При наличии флага ошибки от конкретного кодера производилось его повторное тестирование (для исключения ошибок трансляции данных), и в случае 3-х неуспешных тестов – попытка «реанимировать» кодер перепрошивкой ПЛИС и/или выключения-включения питания этого кодера. При неуспешности 3-х попыток

«реанимации» кодер маркировался как «отказный» и до выключения питания всего блока исключался из списка тестирования и возможных переключений. Таким образом, обеспечивалась сверх-высокая надёжность работы кодера: даже при отказе двух из трёх узлов кодер КЛ-211 продолжал работать.

В 2006–2007 гг. проведено успешное тестирование одного узла кодера КЛ-211 в *ESA* и *NASA* на выполнение требований, включая допустимую задержку: пара кодер-декодер давала задержку в 0,8...0,9 секунд при декодировании программным декодером (на ноутбуке) и 0,4...0,5 секунд при декодировании аппаратным декодером разработки НИИТ. В 2007 г. кодер был доставлен на борт МКС и также прошёл ряд испытаний (рис. 3.3.2–3.3.5). 09.03.08. первый корабль *ATV-1 «Jules Verne»* успешно пристыковался к МКС (фрагмент видео сближения приведён на рис. 3.3.4).

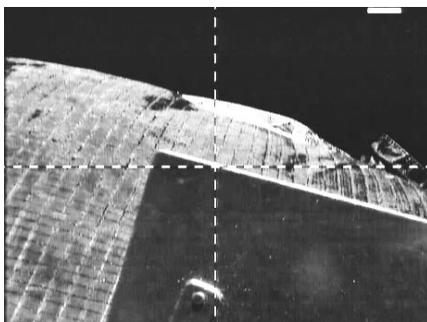


Рис. 3.3.2. Фрагмент видео поверхности МКС от камеры *NASA*



Рис. 3.3.3. Фрагмент видео только телеметрической информации



Рис. 3.3.4. Фрагмент видео от камеры *NASA* (часть МКС)



Рис. 3.3.5. Фрагмент видео с дефектами камеры, вызванными космической радиацией

В период 2008–2014 гг. было запущено 5 кораблей ATV, видеоконтроль сближения с которыми проводился при помощи разработанного кодера КЛ-211, который использовался и при сближении кораблей «Союз» и «Прогресс» с МКС. В этом случае сигнал на кодер подавался от ТВ камеры, расположенной на корабле, через радиотракт комплекса «Клест». Во всех случаях отказов кодера не было. Незначительные недостатки работы, связанные, в частности, с прерыванием декодированного сигнала (до 4 секунд) и вызванные тем, что система анализа, входящая в состав КЛ-211 воспринимала даже кратковременный срыв радиосигнала от кораблей «Союз» и «Прогресс» за отказ одного из кодеров с соответствующим переключением на исправный кодер, были устранены или доработаны (с маскированием кратковременного пропадания сигнала) в последующих модификациях кодера КЛ-211-2.

В настоящее время 1-й экземпляр (кодер *ЕКА*) превысил ресурс на 2 года и продолжает успешно работать. В соответствии с планом работ МКС производится его периодическое тестирование.

Для измерения полной задержки на кодирование, передачу и декодирование в НИИ телевидения создан специальный моделирующий стенд (рис. 3.3.6), включающий штатные приёмо-передатчики, используемые при контроле сближения КА (см. раздел 3.4).



Рис. 3.3.6. Стенд для измерения задержек передачи видеoinформации

Дальнейшие разработки кодеров ведутся на основе способов кодирования как с переходом в спектральную область [176], [177],

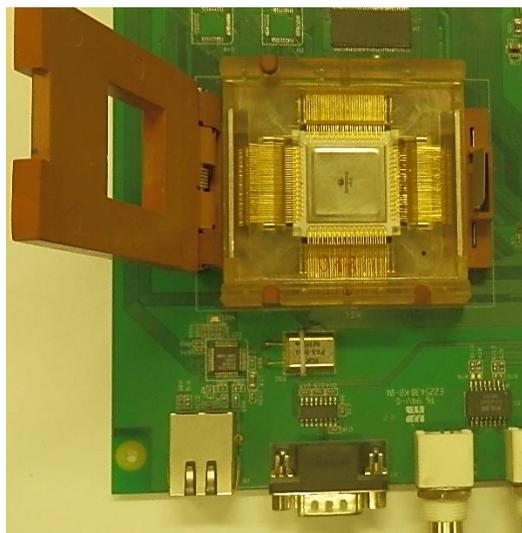
так и без такого перехода [176]. Важнейшим практическим результатом в направлении создания кодеров для бортовой космической аппаратуры стало создание однокристалльного кодера, выполненного на базе трёхмерного дискретного косинусного преобразования – микросхеме 5022ВХ014 [179].

Опора на трёхмерное дискретно-косинусное преобразование связана с высокой эффективностью сжатия сигналов, имеющих экспоненциальную автокорреляционную функцию, наиболее характерную для большинства передаваемых сюжетов (см. разделы 2.1 и 2.3). Перечисленные в разделе 2.3 положительные свойства *EVC*-технологии послужили решающим фактором выбора её в качестве базовой для аппаратной реализации видеокодеров на основе специализированных СБИС отечественной разработки. Первой среди таких СБИС стала микросхема 5022ВХ014, созданная в рамках ОКР «Оптрон-1» (2011–2013 гг.; заказчик ОКР – Минпромторг России, головной исполнитель – АО «НИИТ», соисполнитель – ООО «Юник Ай Сиз»).

Радиационно-стойкая СБИС 5022ВХ014 представляет собой однокристалльную процессорную часть *EVC*-кодера (рис. 3.3.7), выполнена по КМОП технологии 0,18 мкм и предназначена для применения в перспективных (в т. ч., мобильных) комплексах видеонаблюдения и видеосвязи.



а



б

Рис. 3.3.7. *EVC*-кодер (*а*) и входящая в его состав микросхема 5022ВХ014 (*б*)

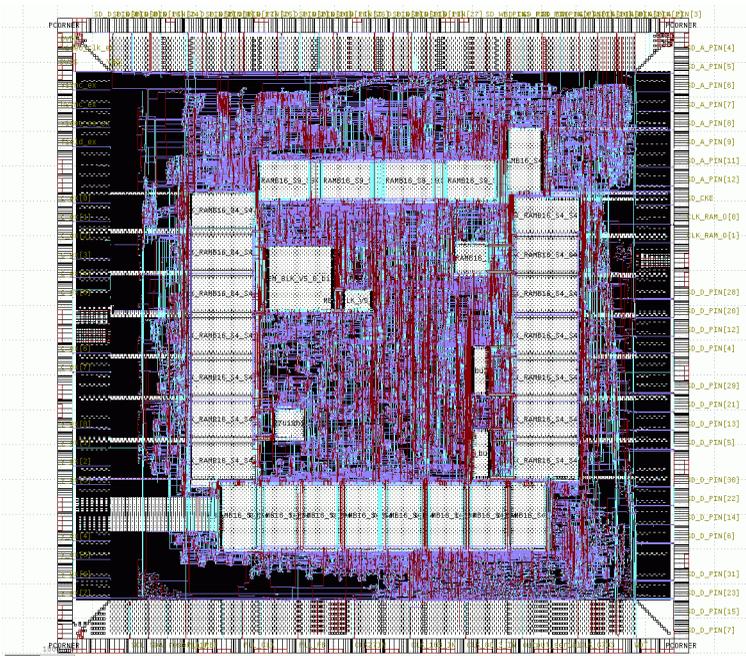


Рис. 3.3.8. Топология кодера 5022BX014

Однокристалльный радиационно-стойкий кодер 5022BX014 разработан для кодирования телевизионных сигналов формата до 4К и имеет более высокую эффективность кодирования по сравнению с кодерами семейства *MPEG* при существенно меньшей вычислительной сложности, характеризующейся использованием около 6 миллионов транзисторов (рис. 3.3.8).

Технические параметры и функциональные характеристики микросхемы 5022BX014 приведены в табл. 3.3.1 и табл. 3.3.2.

Таблица 3.3.1. Технические параметры СБИС 5022BX014

Параметр	Значение			Примечание
	мини-мальное	номи-нальное	макси-мальное	
Напряжение питания ядра, В	1,62	1,8	1,98	На выводах <i>VDD</i>
Напряжение питания периферии, В	3,0	3,3	3,6	На выводах <i>VDDIO</i>
Рабочая температура, °С	минус 60	25	85	
Число выводов		132		
Интерфейс управления		<i>I²C</i>		

Таблица 3.3.2. Функциональные характеристики СБИС 5022ВХ014

Характеристика	Значение	Примечание
Тип входного видеointерфейса	Параллельный синхронный	
Разрядность входных слов	16 (8 бит для отсчёта яркости и 8 бит для цветоразностного отсчёта)	
Формат субдискретизации цвета	4:2:2 во входном потоке, 4:2:0 в выходном потоке	
Частота F_{IN} дискретизации отсчётов яркости, МГц	до 75	
Число строк в активной части кадра	до 2032	Должно быть чётным
Число отсчётов яркости в активной части строки	до 2032	
Способы разложения изображений	Чересстрочное (<i>interlacing, I</i>) или постстрочное (<i>progressive, P</i>)	
Размеры выделяемого «окна интереса»	от 16×16 до 2032×2032	Программируется через порт I^2C
Структура выходного транспортного потока (TS)	По <i>ISO/IEC 13818-1</i> , ГОСТ Р 54998-2012	
Поддерживаемые режимы компрессии ТВ-сигнала	<i>CBR (Constant bitrate)</i> , <i>VBR (Variable bitrate)</i>	Программируется через порт I^2C
Тип внешней памяти	<i>SDRAM</i>	С 32-разрядной шиной данных
Адресуемое пространство <i>SDRAM</i> : число банков × (число строк × число столбцов)	от $4 \times (2^{11} \times 2^8)$ до $4 \times (2^{13} \times 2^{13})$	Программируется через порт I^2C
Частота F_M обмена с памятью, МГц	до 108	
Частота F_0 синхронизации ядра, МГц	до 80	
Частота F_{TS} синхронизации выходного транспортного потока, МГц (скорость V_{TS} транспортного потока, Мбит/с)	от 0,1 до 100	Программируется через порт I^2C
Опорная частота F_{27} , МГц	27	Использ. для формирования

		меток времени в <i>TS</i>
<i>Продолжение таблицы 3.3.2.</i>		
Количество управляющих восьмиразрядных регистров, доступных через порт <i>I²C</i>	25	
Частота обмена по <i>I²C</i> , кГц	100 или 400	

Специфика алгоритмов видеокомпрессии, аппаратно реализованных в СБИС 5022ВХ014, заключается в следующем:

1. Обработке подвергаются трёхмерные блоки данных, содержащие по $8 \times 8 \times R$ отсчётов.

2. С целью обеспечения необходимого соотношения «битрейт/качество» в условиях заранее непредсказуемой смены сцен и сюжетов используется оригинальный контекстно-адаптивный алгоритм разделения блоков на субблоки (алгоритм сплиттирования). Сплиттирование блоков производится с учётом ограничения числа субблоков значением $I_{\max} = 2$.

3. При кодировании субблоков применяется приём их предварительного усечения. Усечению подвергается субблок глубиной $R_i \geq 2$, если образующие его 8×8 -матрицы отсчётов поэлементно малоразличимы (соответствующий им фрагмент видеоряда статичен во времени). Глубина усечённого субблока полагается равной единице, а косинусное преобразование (двумерное!) и энтропийное кодирование применяются лишь к первой его матрице. Остальные матрицы отсчётов усечённого субблока считаются точными копиями первой. В результате гибкого сочетания 3D-ДКП и 2D-ДКП достигается существенное повышение эффективности сжатия видеопотока не только на относительно статичных сюжетах, но и на сюжетах с разнородной динамикой движения в отдельных частях кадра.

4. Сжатие изображений с чересстрочной развёрткой допускается как в полевым, так и в кадровом режимах. В последнем случае два поля каждого кадра предварительно объединяются в изображение с прогрессивной развёрткой. Полевой режим предпочтителен на сюжетах с особо высокой динамикой движения, когда корреляция соседних отсчётов внутри каждого поля выше, нежели в изображении, полученном объединением полей.

5. Компрессия ТВ-сигнала осуществляется без жёсткой привязки к стандартизованным форматам кадра и может быть «выборочно частичной», что достигается возможностью изменения местоположения и размеров «окна интереса».

6. При сжатии видеопотока в режиме *CBR* применяется сочетание двух методов стабилизации качества ТВ-сигнала:

- управление размером зон выходного буфера;
- установка нижней границы диапазона, в пределах которого автоматически изменяется значение фактора квантования.

7. Допускается динамическая смена режимов и параметров компрессии ТВ-сигнала с учётом свойств текущего видеоконтента. Режимы (*VBR*, *CBR*, полевой, кадровый) и параметры кодирования (скорость выходного потока V_{TS} , число совместно кодируемых кадров R , размер зон выходного буфера $ZONE_LSB$ и др.) устанавливаются засылкой служебных данных в управляющие регистры микросхемы 5022BX014. Полная перезагрузка управляющих регистров микросхемы и, соответственно, перенастройка реализуемых ею алгоритмов компрессии занимает не более 3 мкс.

Варианты построения видеокодеров на основе 5022BX014 следуют из конфигурации одноканального *EVC*-кодера (рис. 3.3.9).

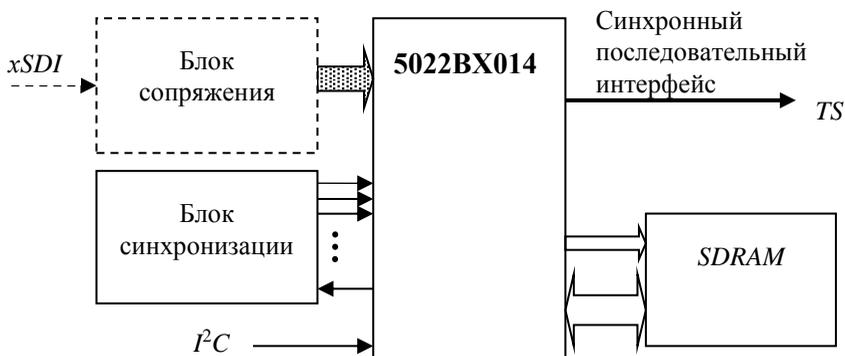


Рис. 3.3.9. Структура одноканального видеокодера на СБИС 5022BX014

Помимо СБИС 5022BX014 в состав кодера включается, по крайней мере, одна микросхема внешней памяти *SDRAM* и блок синхронизации, вырабатывающий синхроимпульсы с частотами F_{IN} , F_M , F_0 , F_{27} и F_{TS} (см. табл. 3.3.2). Для компрессии ТВ-сигнала от источника с последовательным интерфейсом *SDSDI* или *HDSDI* дополнительно необходим блок сопряжения, обеспечивающий дескремблирование сигнала физического уровня, декодирование

синхронизирующих и идентификационных посылок, десериализацию входного битового потока и формирование сигналов управления входным портом микросхемы 5022ВХ014.

Одноканальный вариант *EVC*-кодера пригоден для сжатия ТВ-сигналов с частотой дискретизации отсчётов яркости, не превышающей предельно допустимого для СБИС 5022ВХ014 значения параметра $F_{IN} = 75$ МГц (см. табл. 3.3.2). К числу таких ТВ-сигналов относятся, например, сигналы вещательных форматов 720×576/50/*I* (*ITU-R BT.601*), 720×576/50/*P* (*ITU-R BT.1358*), 1280×720/50/*P* (*ITU-R BT.1847*), 1920×1080/50/*I*, 1920×1080/25/*P* (*ITU-R BT.709*). Сжатие ТВ-сигналов с более высокой частотой дискретизации возможно на основе многоканальных схем кодирования без буферизации или с буферизацией отсчётов, в зависимости от типа применяемого источника.

Многоканальная компрессия без буферизации отсчётов является наиболее простым и естественным решением в случаях, когда источник ТВ-сигнала самостоятельно осуществляет пространственную декомпозицию видеоряда. Примером такого источника может служить ТВ-камера с отечественным матричным КМОП фотоприёмником 1205ХВ014 (АО «НИИ телевидения», 2014 г.). Каждый ТВ-кадр формата 1024×1024, формируемый фотоприёмником 1205ХВ014, разделяется на 2 или 4 субкадра, «вынос» которых осуществляется параллельными видеопотоками с частотой следования отсчётов, соответственно, в 2 или в 4 раза ниже частоты, требуемой при последовательном «выносе» кадра. Для сжатия таких потоков может быть использован двух- или четырёхканальный кодер со структурой каждого канала, представленной на рис. 3.3.8. При этом максимальная результирующая частота кадров составит 100 Гц для двухканального варианта и 200 Гц для четырёхканального варианта компрессии видеопотоков.

В случае источника, формирующего единственный видеопоток с частотой дискретизации отсчётов более 75 МГц, необходима схема многоканальной компрессии с буферизацией данных. Целью буферизации является преобразование исходного видеопотока в параллельные потоки с допустимой частотой следования отсчётов в каждом из них. Разделение исходного потока на составляющие возможно по принципу временной, пространственной или пространственно-временной декомпозиции видеоряда.

Примером использования временной декомпозиции (рис. 3.3.10), является двухканальный кодер на СБИС 5022ВХ014, обеспечивающего сжатие ТВ-сигнала 1920×1080/50/*P* (*ITU-R BT.709*)

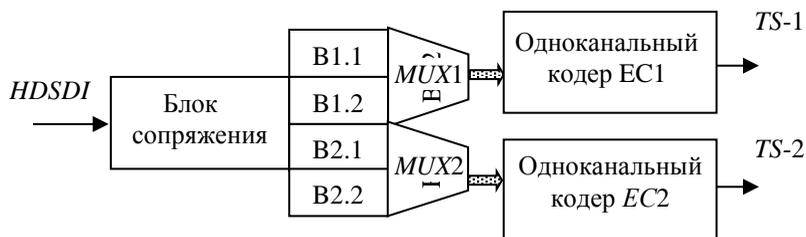


Рис. 3.3.10. Структура двухканального EVC-кодера с временной декомпозицией исходного видеоряда

Принцип работы двухканального кодера поясняется циклограммой на рис. 3.3.11.

Пакет i	Пакет $i + 1$	Пакет $i + 2$	Пакет $i + 3$	Пакет $i + 4$
Загрузка в B1.1		Загрузка в B1.2		Загрузка в B1.1
...	Обр-ка в EC1 пакета i из B1.1		Обр-ка в EC1 пакета $i + 2$ из B1.2	
	Загрузка в		Загрузка в B2.2	
Обработка в EC2 пакета $i - 1$ из B2.2		Обработка в EC2 пакета $i + 1$ из B2.1		...

Рис. 3.3.11. Циклограмма компрессии ТВ-сигнала 1920×1080/50/P двухканальным кодером на СБИС 5022ВХ014

Битовый поток от источника, преобразованный блоком сопряжения в параллельную форму [ITU-R BT.1120, Fig. 3a], попеременно и циклически загружается 16-разрядными словами (парами отсчётов Y , CB/CR) в буферы B1.1, B2.1, B1.2, B2.2, B1.1, ... и т. д. Каждый из четырёх буферов рассчитан на хранение отсчётов одного пакета кадров, совместно обрабатываемых микросхемой 5022ВХ014. Запись пар отсчётов в буферы производится на частоте 148,5 МГц, а считывание и выдача их на входные порты микросхем 5022ВХ014 – на частоте 74,25 МГц. При этом процессы поочередной записи отсчётов i -го и $(i + 1)$ -го пакетов в пару буферов совмещаются во времени с процессами считывания и выдачи на обработку отсчётов $(i - 2)$ -го и $(i - 1)$ -го пакетов из другой пары буферов [179], [180].

Достоинством варианта многоканальной компрессии с временной декомпозицией видеоряда является возможность декодирования и воспроизведения «прореженного» ТВ-сигнала при отказе одного из каналов кодера или одного из каналов связи. Недостаток данного технического решения – привнесение значительной дополнительной задержки сигнала, равной времени буферизации первого пакета кадров. На рис. 3.3.12 приведена структурная схема четырехканального *EVC*-кодера, предназначенного для сжатия ТВ-сигнала 3840×2160/25/P [ITU-R BT.2020].

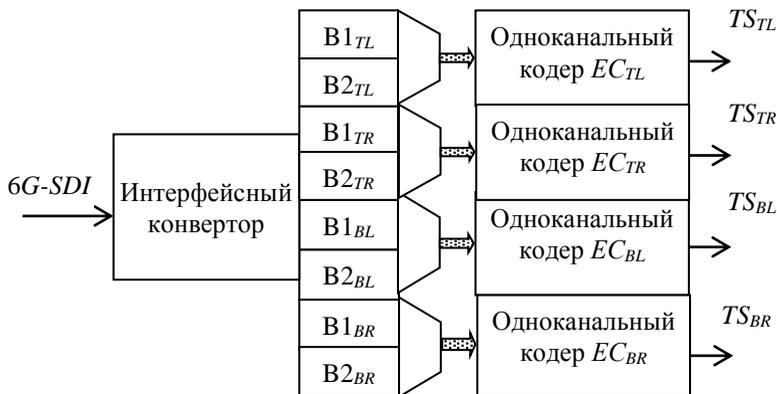


Рис. 3.3.12. Структура четырёхканального *EVC*-кодера с пространственной декомпозицией исходного видеоряда

В данном варианте кодера используется принцип пространственной декомпозиции видеоряда, суть которого поясняется рисунками 3.3.13, 3.3.14. Каждый телевизионный кадр, формируемый источником, разделяется на 4 субкадра формата 1920×1080: верхний левый – *TL*, верхний правый – *TR*, нижний левый – *BL* и нижний правый – *BR* (см. рис. 3.3.14). Компоновка субкадров выполняется интерфейсным конвертором (см. рис. 3.3.13), на вход которого поступает мультиплексированный битовый поток *6G-SDI*, соответствующий разложению кадра на 4 субизображения с чередованием отсчётов через 2 позиции по строке [ITU-R BT.2077, Fig. 3-4, 3-1-3]. В результате дескремблирования и десериализации битовый поток *6G-SDI* преобразуется конвертором в восьмипотоковый параллельный мультиплекс [ITU-R BT.2077, Fig. 3-11], синтаксическая структура которого повторяется через каждые 16 отсчётов (см. рис. 3.3.12). Частота следования отсчётов в параллельном мультиплексе составляет 594 МГц.

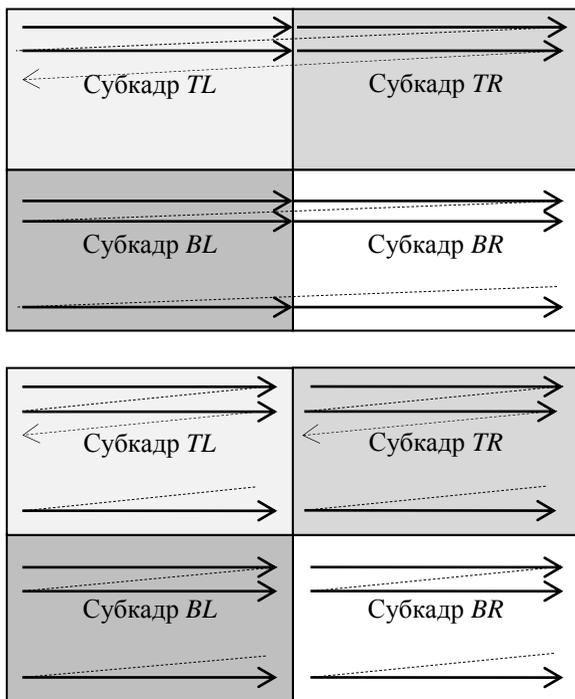


Рис. 3.3.13. Порядок буферизации субкадров:
 а – очередность последовательной записи отсчётов в буферы;
 б – очередность параллельного считывания отсчётов из буферов

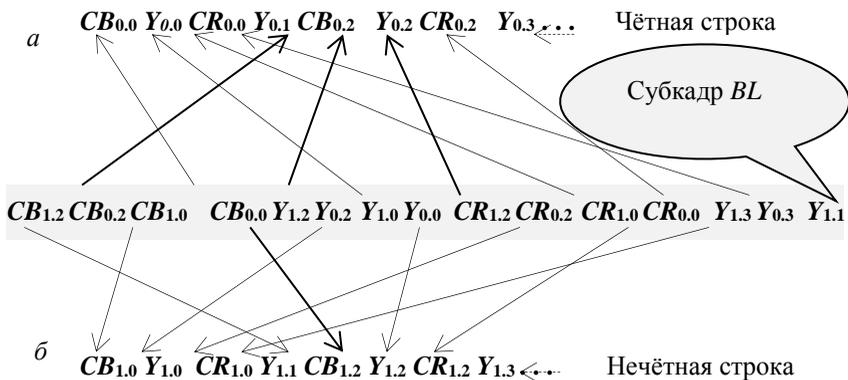


Рис. 3.3.14. Схема компоновки субкадров из отсчётов параллельного мультиплекса

Отсчёты параллельного мультиплекса, относящиеся к одной синтаксической группе и принадлежащие двум смежным строкам текущего субкадра TL , TR , BL или BR , подвергаются перестановке, как показано на рис.3.3.12, и загружаются в буфер, например, в $B1_{TL}$, $B1_{TR}$, $B1_{BL}$ или $B1_{BR}$ соответственно. Минимальная частота загрузки может составлять 74,25 МГц (по 8 отсчётов в каждом такте записи).

На фоне последовательной загрузки в буферы $B1$ отсчётов i -го кадра производится параллельное считывание отсчётов $(i - 1)$ -го кадра из буферов $B2$ на частоте 74,25 МГц. Порядок использования буферов $B1$ и $B2$ (запись/чтение) чередуется от кадра к кадру.

К числу главных достоинств многоканальной компрессии с пространственной декомпозиций видеоряда следует отнести малую дополнительную задержку сжимаемого ТВ-сигнала (на время одного кадра).

Использованный комплексный подход к проектированию систем видеоконпрессии может быть обозначен формулой: «От новой информационной технологии к перспективным электронным компонентам». Продуктивность такого подхода подтверждена на практике: разработчикам удалось всего лишь за одну итерацию создать первую отечественную СБИС, пригодную для эффективного сжатия в реальном времени цифрового телевизионного сигнала высокой и сверхвысокой чёткости.

По своим функциональным возможностям СБИС 5022ВХ014 [179], [180] не уступает лучшим зарубежным аналогам, выгодно отличается от них повышенной радиационной стойкостью и может найти широкое применение в специализированных системах видеонаблюдения и видеосвязи.

3.4. Контроль сближения КА

Примером современных систем космического телевидения может служить комплекс контроля сближения КА, [62]–[64]. Более полувека КА стыкуются на орбите с использованием радиотехнических и оптико-электронных измерительных систем [1]. Подробности триангуляционного метода измерения координат и оценкам зависимости точности их измерения от дальности, алгоритмическим и конструктивным методам повышения точности, структуре и параметрам систем и специального программного обеспечения, автоматизации процесса сближения КА уделяется много внимания [18], [19], [41], [42], [62]–[64] [159]–[162], см. гл. 2.

Для систем контроля сближения КА характерны различные способы определения относительного расположения и ориентации КА, используемые на различных дистанциях. Для дальней зоны характерно использование априорной информации о форме наблюдаемого КА (рис. 3.4.1 [62]–[64]), для ближней зоны – использование специальных объёмных реперов (рис. 3.4.2).

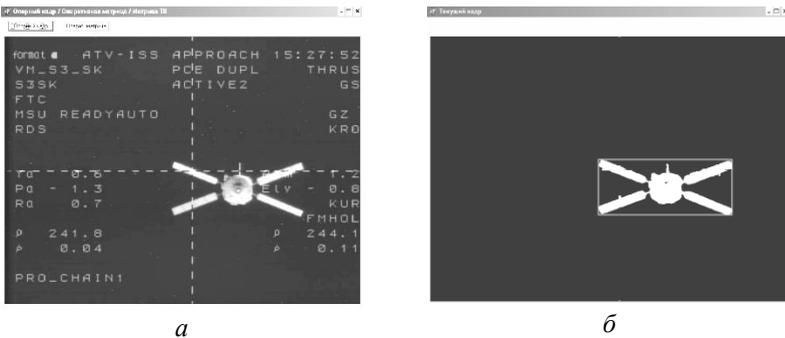


Рис. 3.4.1. Примеры: а – исходного; б – обработанного ТВ-кадров с изображением КА на дальней дистанции

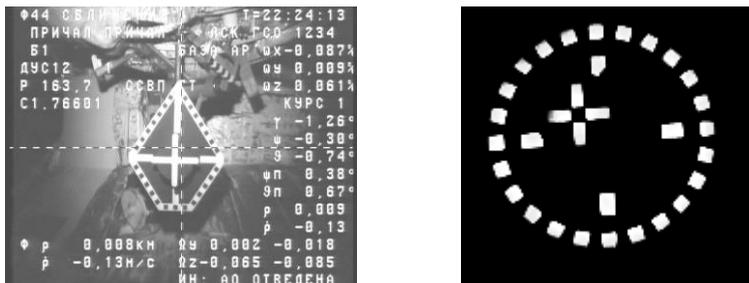


Рис. 3.4.2. Объёмные реперы позволяют по смещению малого и большого перекрестий измерить отклонение стыковочных узлов кооперируемых КА

Форма таких реперов может быть весьма разнообразной (рис. 3.4.3, [62]–[64]) и применение их требует детального исследования и обсуждения (рис. 3.4.4).



Рис. 3.4.3. Варианты реперов, включающие уголковые отражатели и катафоты



Рис. 3.4.4. Обсуждение методики сближения и стыковки КА специалистами ЕКА, РКК «Энергия» и НИИ телевидения

Для наблюдения за кооперируемыми КА на обоих из них устанавливаются ТВ камеры с «горячим» резервированием всего тракта от оптики до сигнала изображения (рис. 3.4.5, 3.4.6). Эти ТВ камеры, входящие в телевизионный комплекс КЛ-100 и его модификации, в соответствии с *принципом итерационной стыковки* С. П. Королёва, имеют объективы с различными фокусными расстояниями.



Рис. 3.4.5. ТВ камера КЛ-153 на КА «Прогресс»



Рис. 3.4.6. ТВ камера КЛ-154 на МКС

Одним из первых таких комплексов, разработанных в НИИ телевидения, является аналоговый **телевизионный комплекс КЛ-100-01М5** (2008–2011). Он предназначен для решения следующих задач служебного телевидения при работе в составе ТПК «Союз ТМА-М»:

- наблюдения процесса сближения космических кораблей (КК);
- ведения телевизионных репортажей из спускаемого аппарата (СА) на активном участке и с орбиты искусственного спутника Земли (ОИСЗ);
- трансляции и коммутации ТВ сигналов различных систем КК;
- трансляции ТВ сигнала режима ручного управления спуском СА с ОИСЗ;
- трансляции и коммутации ТВ сигнала, передаваемого из ПКСА;
- передачи на Землю по радиолинии телевизионной информации на старте, на активном участке и с ОИСЗ;
- передачи телевизионной информации на вход радиолинии «Квант-В».

В состав комплекса входят:

- телевизионная камера контроля сближения КА КЛ-153М-1 (установлена снаружи КА, см. рис. 1.2.1, 3.4.5);
- телевизионная камера внутреннего обзора КЛ-152М (установлена в спускаемом аппарате, рис. 3.2.1);
- блок коммутации видеосигналов КЛ-105М (2шт., рис. 3.4.7);
- блок радиопередатчика КЛ-108М-М (рис. 3.4.8);
- трансформатор высокочастотный.



Рис. 3.4.7. Коммутатор КЛ-105М



Рис. 3.4.8. Радиопередатчик КЛ-108М-М

Архитектуру комплекса и связи с остальными системами КК поясняет упрощённая функциональная схема, представленная на рис. 3.4.9, где СУБК – система управления бортовым комплексом, АФУ – антенно-фидерное устройство ПТС – полный телевизионный сигнал. Коммутаторы КЛ-105М являются своеобразным сердцем комплекса. Они позволяют соединить любой источник телевизионного сигнала в системе с любым потребителем. Мощность высокочастотных колебаний, генерируемых блоком радиопередатчика КЛ-108М-М, ($15,0 \pm 5,0$) Вт, девиация ($8,0 \pm 2,0$) МГц,

средняя частота $(463,0 \pm 2,0)$ МГц. Блоки, изображённые

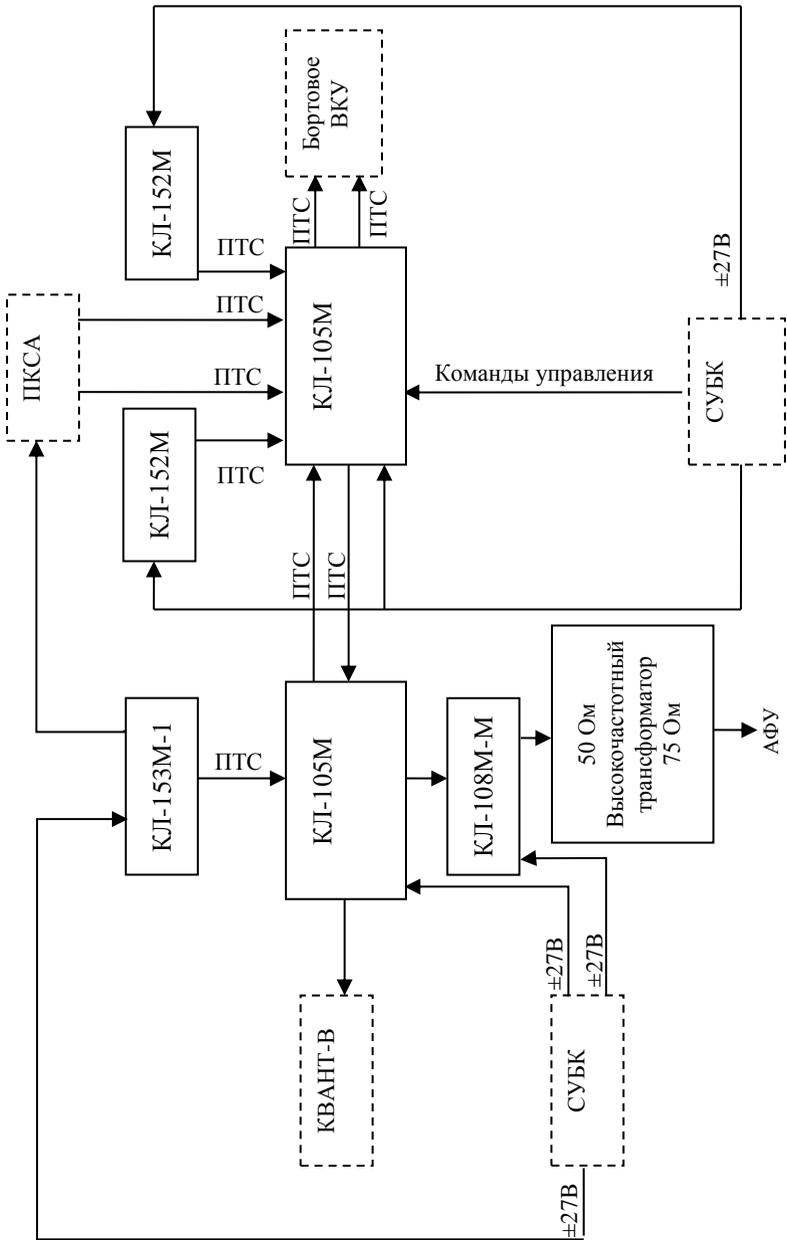


Рис. 3.4.9. Упрощённая функциональная схема комплекса КЛ-100-01М5

пунктиром, не входят в состав комплекса. Управление комплексом

осуществляется подачей команд, в виде импульсов отрицательной полярности размахом 27_{-4}^{+7} В и длительностью 0,2...2 с. Комплекс выдаёт на передатчик «Квант-В», бортовое ВКУ и другим потребителям полный чёрно-белый телевизионный сигнал (ГОСТ 7845-92).

Телевизионный комплекс КЛ-100-19М1 разработан для применения в составе ТК «Прогресс М-М». Аналоговый телевизионный комплекс КЛ-100-19М1 предназначен для:

- наблюдения за сближением космических кораблей в процессе сближения и стыковки;
- передачи ТВ сигнала, поступающего от аппаратуры системы «Символ»;
- совмещения (наложения) ТВ сигналов, передаваемых с аппаратуры «Символ» и внешней ТВ камеры;
- передачи телевизионной информации на Землю по радиолинии телевизионной системы;
- выдачи телевизионной информации на вход радиолинии «Квант-В».

В состав комплекса входят:

- телевизионная камера КЛ-153М-1;
- блок коммутации видеосигналов КЛ-105М;
- блок радиопередатчика КЛ-108М-М;
- синхронизатор КЛ-106М (рис. 3.4.10).

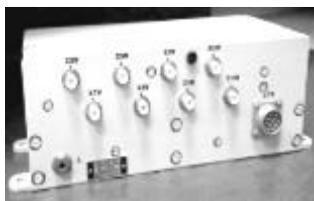


Рис. 3.4.10

Архитектуру комплекса, а также его связи с остальными системами КА иллюстрирует функциональная схема (рис. 3.4.11). Блоки, изображенные пунктиром, не входят в состав комплекса. Комплекс управляется подачей команд, в виде импульсов отрицательной полярности размахом 27_{-4}^{+7} В и длительностью 0,2...2 с. Комплекс выдаёт на передатчик «Квант-В» и другим потребителям полный чёрно-белый ТВ сигнал (ГОСТ 7845-92). В режиме «Дисплей+ ТВ» синхронизатор КЛ-106М выдаёт на камеру КЛ-153М-1 и систему «Символ» сигнал ССЦ для обеспечения ведомого (синхронного) режима работы. В этом режиме производится наложение служебной видеоинформации (цифробуквенной информации о параметрах КК) системы «Символ» на ТВ сигнал камеры контроля сближения КА.

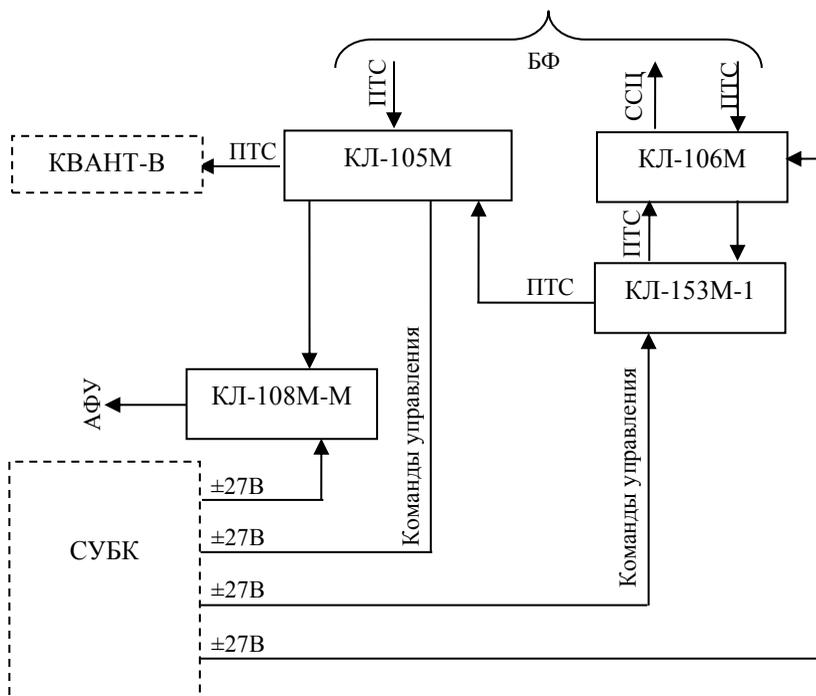


Рис. 3.4.11. Упрощённая функциональная схема комплекса КЛ-100-19М1;
 БФИ – блок формирования изображения,
 ССЦ – сигнал синхронизации централизованный

Связь между датчиками видеоинформации и потребителями осуществляет коммутатор, который коммутирует на потребители в соответствии с режимами работы комплекса по командам с Земли полные ТВ сигналы, поступающие на его входы.

Телевизионный комплекс КЛ-100-01Ц (2008–2013г.) предназначен для работы в составе ТПК «Союз МС». В отличие от ранее описанных комплексов он имеет цифровую радиолинию, то есть он является первой ласточкой в деле создания полностью цифровой телевизионной системы. Комплекс предназначен для решения следующих задач:

- наблюдения за сближением КК;
- ведения телевизионных репортажей из СА на активном участке и с ОИСЗ;
- трансляции и коммутации ТВ сигналов различных систем корабля;

- передачи и приёма телевизионной информации через моноблок КЛ-108/109Ц на старте, на активном участке и с ОИСЗ;
- передачи цифровой ТВ информации на вход радиолинии единой командно-телеметрической системы (ЕКТС)¹;
- приёма и передачи по радиолинии цифровой информации, содержащей команды управления и цифровые данные.

Упрощённая функциональная схема комплекса (рис. 3.4.12) поясняет архитектуру комплекса и связи его составляющих с остальными системами КК.

В состав комплекса входят:

- телевизионная камера КЛ-153М-1;
- телевизионная камера внутреннего обзора КЛ-152М;
- блок коммутации видеосигналов КЛ-105М;
- цифровой моноблок КЛ-108/109Ц.

Этот шаг по переходу к полностью цифровой телевизионной системе основан на проведённом в последние годы в АО «НИИ телевидения» комплексе НИОКР по созданию нового поколения аппаратуры передачи телевизионной информации по каналам «борт–борт» и «борт–Земля». В результате с 2015 г. передача телевизионной информации между МКС, КА «Союз», КА «Прогресс» и наземными приёмными телевизионными комплексами выполняется по цифровым радиолиниям, что позволило:

- существенно повысить помехоустойчивость радиолинии «борт–Земля» и электромагнитную совместимость наземного приёмного телевизионного комплекса (НПТВК) в условиях предельно сложной электромагнитной обстановки в полосе частот, используемых для передачи телевизионной информации по радиолинии «борт–Земля»;
- значительно повысить качество телевизионного изображения, получаемого НПТВК с борта КА (МКС);
- обеспечить возможность инкапсуляции в передаваемый телевизионный сигнал голосовой и телеметрической информации;
- обеспечить возможность увеличения количества бортовых ТВ камер, информация с которых одновременно поступает на НПТВК;
- избавиться от недостатков, присущих аналоговому каналу – низкого качества наблюдаемого в ЦУП телевизионного изображения в процессе запуска, выведения на орбиту и маневрирования КА.

¹ ЕКТС разработана на замену системы «Квант-В»; она передаёт данные по единому цифровому каналу, и с её помощью будет задействована новая многофункциональная космическая система ретрансляции (МКСР) «Луч».

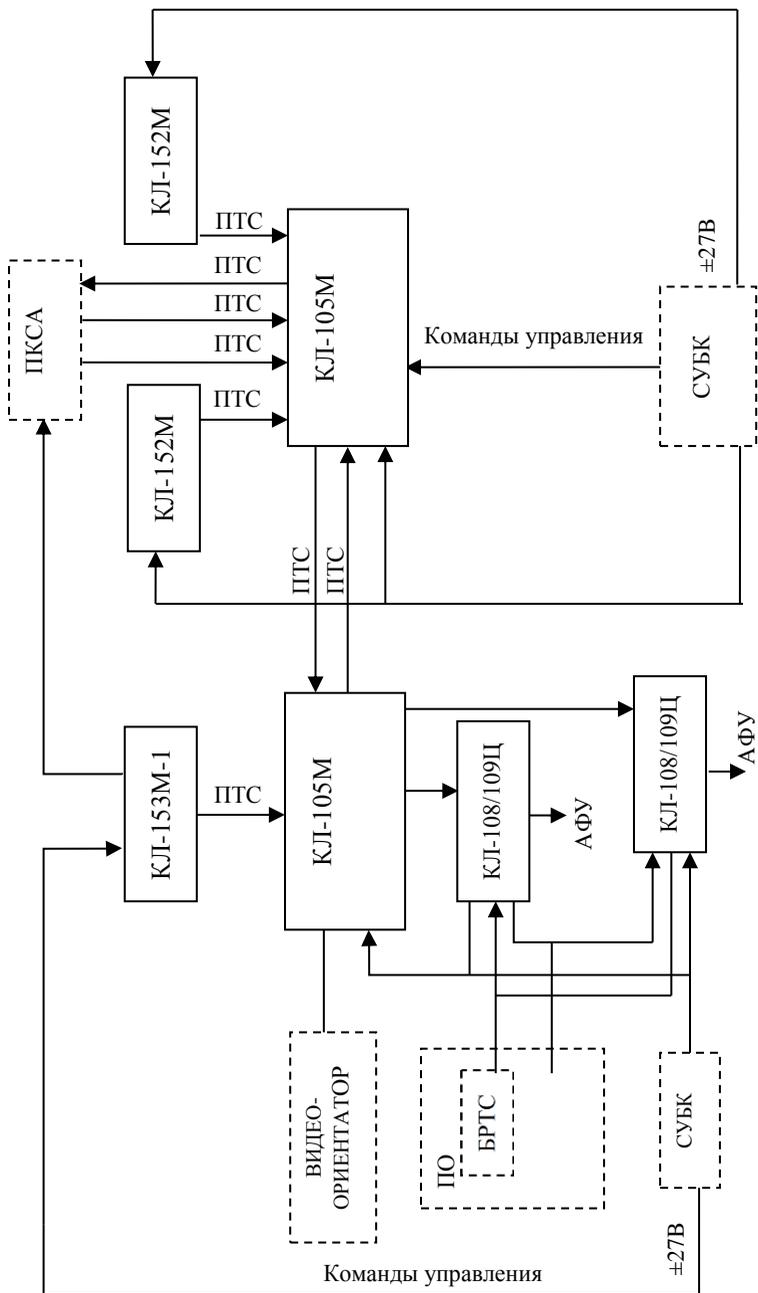


Рис. 3.4.12. Упрощённая функциональная схема комплекса КЈ-100-01Ц

Моноблок «КЛ-108/109Ц» устанавливается на борту КА «Союз» и «Прогресс» и состоит из передающего устройства (ПРДУ) и приёмного устройства (ПРМУ). ПРДУ обеспечивает цифровое кодирование аналогового видеосигнала с последующим преобразованием данного сигнала, звука и телеметрической информации в цифровой транспортный поток и передачу транспортного потока от КА «Союз» и «Прогресс». ПРМУ обеспечивает высокочастотное разделение каналов приёма и передачи, приём от МКС транспортного потока, а также преобразование принятого потока в звук и команды управления.

Параметры канала кодирования и приёма-передачи:

- диапазон используемых радиочастот (при передаче сигнала) от 458,45 до 462,45 МГц;
- диапазон используемых радиочастот (при приёме сигнала) от 418,45 до 422,45 МГц;
- мощность высокочастотных колебаний на выходе передающего устройства не более 20 Вт;
- реальная чувствительность по высокочастотному входу приёмного устройства не более 110 мкВ;
- скорость передачи данных не менее 3 Мбит/с;
- ввод аналогового видеосигнала;
- передача звукового сигнала в полосе частот от 0,2 до 3,4 кГц и размахом $(0,8 \pm 0,2)$ В;
- выход команд управления и данных АСН – цифровая последовательность *MIL-STD-1553* в соответствии с ГОСТ Р 52070;
- возможность выдачи цифрового ТВ сигнала *MPEG-2* со скоростью 256 кбит/с в ведомом режиме;
- высокочастотное разделение каналов приёма и передачи;
- уровень выходного сигнала помехи интерфейса *MIL-STD-1553* при включении (выключении) моноблока не превышает ± 250 мВ.

Телевизионный комплекс КЛ-100-19Ц с цифровым радиоканалом разработан для применения в составе ТГК «Прогресс МС». Архитектура комплекса и связи его блоков с остальными системами КА показаны на функциональной схеме (рис. 3.4.13). Комплекс предназначен для:

- наблюдения сближения космических кораблей;
- передачи ТВ сигнала, поступающего от блока формирования информации БФИ-М;
- совмещения ТВ сигналов, передаваемых с БФИ-М и внешней ТВ камеры;

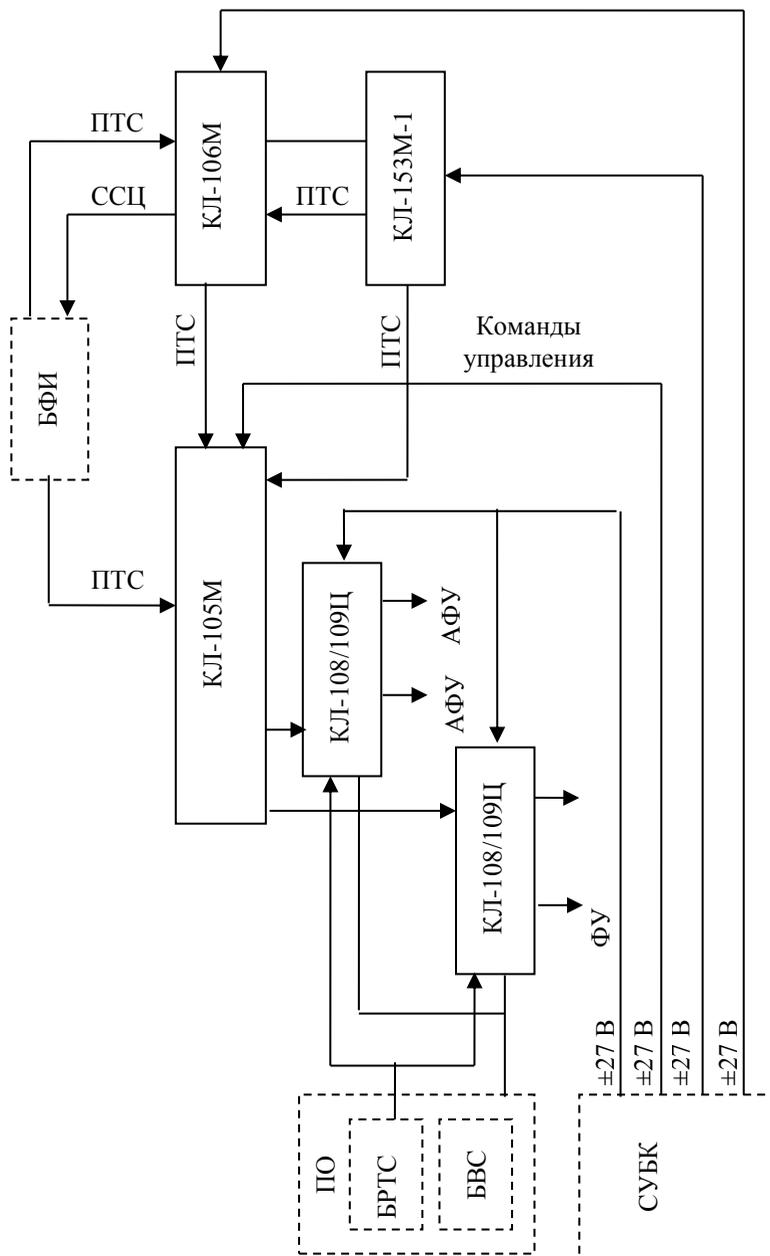


Рис. 3. 4.13. Упрощённая функциональная схема комплекса КЈЛ-100-19Ц

- передачи и приёма телевизионной информации через моноблок КЛ-108/109Ц на старте, на активном участке и с ОИСЗ;
- передачи ТВ информации на вход радиoliniи системы ЕКТС;
- приёма и передачи цифровой информации по радиoliniи, содержащей команды управления и цифровые данные.

В состав комплекса входят:

- телевизионная камера контроля сближения КК КЛ-153М-1;
- блок коммутации видеосигналов КЛ-105М;
- синхронизатор КЛ-106М;
- цифровой моноблок КЛ-108/109Ц.

В режиме «Дисплей + ТВ» синхронизатор КЛ-106М выдаёт на камеру КЛ-153М-1 и модернизированный блок формирования информации (БФИ-М) сигнал ССЦ для обеспечения ведомого режима и обеспечивает замешивание видеоинформации БФИ-М в ТВ сигнал камеры КЛ-153М-1.

Телевизионный комплекс КЛ-100-52 (МЛМ) (2011–2012 г.) разработан для использования в составе изделия МЛМ (многоцелевой лабораторный модуль). Комплекс предназначен для решения следующих задач служебного телевидения:

- формирование ТВ изображения МКС с помощью внешней ТВ камеры для контроля сближения МЛМ к МКС в телеоператорном режиме управления (ТОРУ);
- приём ТВ сигналов от системы управления движением и навигацией (СУДН), содержащих символьную информацию для обеспечения стыковки МЛМ к МКС в режиме ТОРУ;
- синхронизацию работы ТВ камеры ТОРУ с СУДН;
- сложение ТВ сигналов ТВ камеры ТОРУ и СУДН;
- наблюдение за операциями сближения и стыковки к МЛМ транспортных грузовых и пилотируемых кораблей;
- передачу ТВ информации, предназначенной для контроля сближения и стыковки МЛМ к МКС в режиме ТОРУ, на телевизионную систему служебного модуля (ТВС СМ) и на станции типа «Орион» наземного измерительного пункта Российского сегмента (НИП РС) МКС;
- наблюдение за операциями со шлюзовой камерой;
- приём и коммутацию ТВ сигналов от стартовой и базовых точек европейского манипулятора (*ERA*) (два сюжета одновременно);
- приём и коммутацию ТВ сигналов от универсальных рабочих мест комплекса целевых нагрузок;

- приём и коммутацию ТВ сигналов от шлюзовой камеры;
- ведение членами экипажа ТВ репортажа из ГО и снаружи МЛМ при помощи цветной репортажной камеры КЛ-103Ц, приносимой из служебного модуля;
- ведение членами экипажа ТВ репортажа из ГО МЛМ при помощи камеры из состава комплекса средств поддержки экипажа (КСПЭ), приносимой из СМ, запись информации на встроенный видеоманитофон камеры из состава КСПЭ;
- коммутацию любой телевизионной информации, поступающей на блок коммутации, на цветные видеомониторы устройства сопряжения пульта управления бортового комплекса управления (УСО-ПУ-БКУ);
- приём ТВ сигнала со служебного модуля по внешнему кабелю;
- приём ТВ сигнала от ТВС СМ через ВЧ соединители стыковочных агрегатов СМ и МЛМ;
- передача ТВ сигнала на СМ через ВЧ соединители стыковочных агрегатов;
- передача ТВ сигнала на СМ по внешнему кабелю;
- преобразование аналоговых телевизионных сигналов в транспортный поток *MPEG-2*.

Упрощённая функциональная схема комплекса КЛ-100-52 (рис. 3.4.14) поясняет архитектуру комплекса и связи его составляющих с остальными системами КК (изображены пунктирными линиями).

В состав комплекса входят:

- телевизионная камера контроля сближения КК КЛ-155;
- синхронизатор КЛ-106М;
- блок коммутации видеосигналов КЛ-160АМ (рис. 3.4.15);
- кодер *MPEG-2* КЛ-211-2 (рис. 3.4.15);
- блок радиопередатчика КЛ-108М-М.

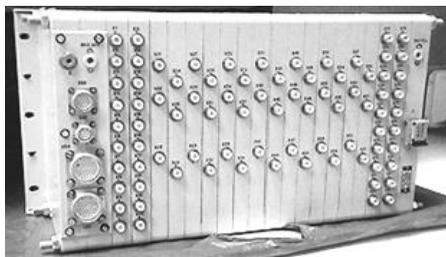


Рис. 3.4.15. Блок коммутации
КЛ-160АМ

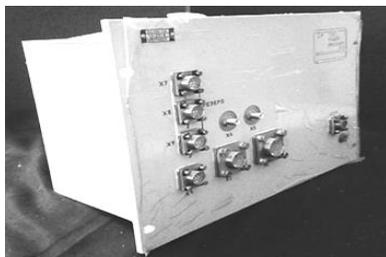


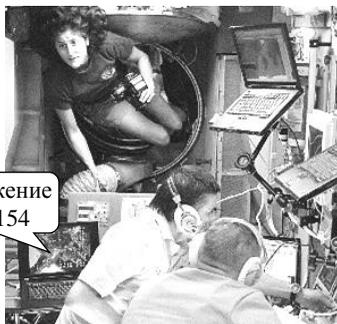
Рис. 3.4.16. Кодер
КЛ-211-2

Связь между датчиками и потребителями осуществляет коммутатор ТВ сигналов (КЛ-160АМ). Он коммутирует полные ТВ сигналы, поступающие на его входы, на потребителей в соответствии с режимами работы комплекса по командам СУБК. В режиме «Дисплей + ТВ» обеспечивается одновременное воспроизведение на экране бортового ВКУ и передачу по радиолинии ТВ сигналов с камеры КЛ-155 и аппаратуры БФИ (СУДН), при этом синхронизатор КЛ-106М выдаёт на камеру и аппаратуру БФИ сигнал ССЦ.

Комплекс преобразует ТВ сигналы в транспортный поток *MPEG-2* и выдаёт его на выходные соединители блоков КЛ-211-2 *Ethernet 10/100 BASE-T* на скорости 100 Мбит/с со следующими параметрами преобразования:

- формат цветового кодирования 4:2:0;
- скорость транспортного потока *MPEG-2*...4 Мбит/с;
- формат группы кадров *IPPP* (без компенсации движения).

Особенностью кодера этого комплекса является требование малых задержек для обеспечения возможности оперативного вмешательства космонавтов в процесс сближения КА на малых дистанциях (рис. 3.4.17).



Изображение с КЛ-154

Рис. 3.4.17. Контроль космонавтами на МКС сближения КК на ближней дистанции

Таким образом, в НИИ телевидения по заданию РКК «Энергия» им. С. П. Королёва выполнен большой комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию нового поколения аппаратуры связи по каналам «борт–борт» и «борт–Земля», включающей бортовые и наземные (рис. 3.4.18–3.4.20) подсистемы и обеспечивающей передачу телевизионной информации между международной космической станцией (МКС), КА «Союз, КА «Прогресс» и наземными приёмными телевизионными комплексами (НПТВК) по цифровым радиолиниям.

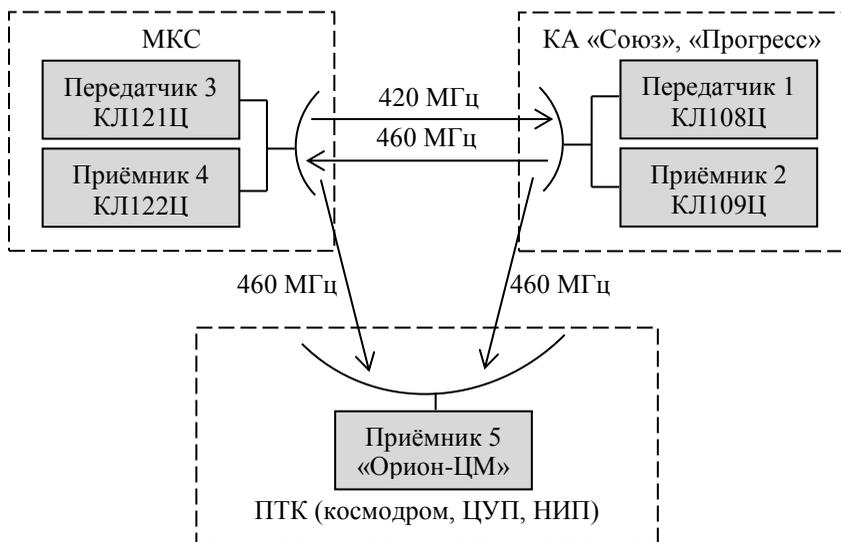


Рис. 3.4.18. Состав цифровой линии связи «МКС – КА – наземный ПТК»



Рис. 3.4.19. Приёмная антенна космической связи на космодроме Байконур; эффективная площадь почти 200 м²



Рис. 3.4.20. Первый эксперимент по приёму цифрового ТВ сигнала с транспортного корабля «Прогресс» на космодроме «Байконур»

Передача информации по цифровым радиолиниям позволила:

- значительно повысить помехоустойчивость радиолинии «борт–Земля» и электромагнитную совместимость НПТВК в условиях предельно сложной электромагнитной обстановки в полосе частот, используемых для передачи телевизионной информации по радиолинии «борт–Земля»;
- значительно повысить качество телевизионного изображения, получаемого НПТВК с борта КА (МКС) (рис. 3.4.21, 3.4.22);

- обеспечить возможность инкапсуляции в передаваемый телевизионный сигнал голосовой и телеметрической информации;
- обеспечить возможность увеличения количества бортовых ТВ камер, информация с которых одновременно поступает на НПТВК;
- избавиться от недостатков, присущих аналоговому каналу – низкого качества наблюдаемого в ЦУП телевизионного изображения в процессе запуска, выведения на орбиту и маневрирования КА, связанных, в частности, с вращением КА вокруг собственной оси;
- существенно снизить габариты, вес и потребление электроэнергии цифровой аппаратуры бортовых комплексов.

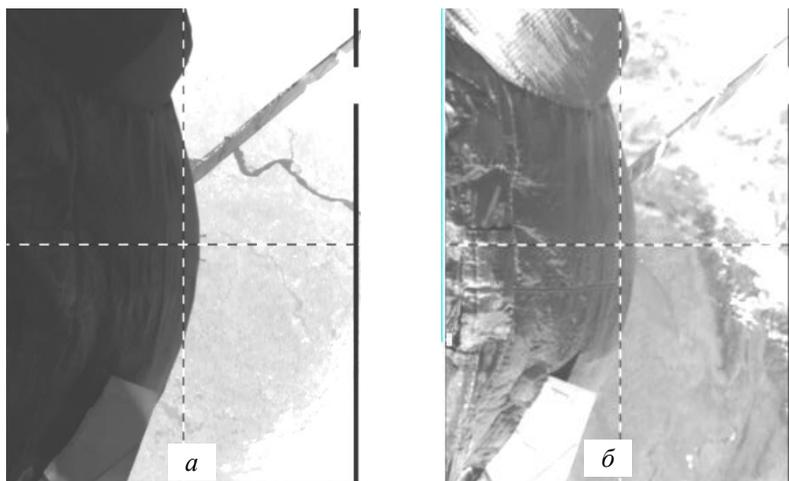


Рис. 3.4.21. Изображение, переданное по цифровому радиоканалу, на различных участках орбиты до стыковки с МКС на фоне освещённой солнцем Земли: КА в тени Земли – а; КА вне тени Земли – б



Рис. 3.4.22. Изображение МКС, переданное с транспортного корабля в ходе сближения на дистанциях 7,5 км и 0,06 км

В процессе разработки цифровых радиолиний были решены сложные задачи по сжатию телевизионных сигналов на борту КА, обеспечению дуплексного режима работы радиолиний «борт–борт», их совместимость с аппаратурой передачи телевизионной информации перспективного скафандра для работ за пределами МКС (см. раздел 3.6), синхронизации принимаемых телевизионных сигналов с учётом компенсации эффекта Доплера, переоборудованы все наземные приёмные телевизионные комплексы для приёма цифрового телевизионного сигнала.

Расширение возможностей системы контроля сближения КА связано с развитием ТВ камер в части адаптации их параметров к дальности до кооперируемого КА (см. раздел 2.4) и радиоканалов.

Развитие системы приёма и передачи цифрового телевизионного сигнала в интересах контроля сближения и стыковки КА ведётся в направлениях:

- разработки функционально полной линейки радиационностойкой элементной базы для бортовых телевизионных комплексов;
- создания малогабаритных и необслуживаемых НПТВК с дуплексным режимом работы радиолинии «борт–Земля»; перспективные наземные системы будут оснащены приёмными комплексами с уменьшенными на порядок по сравнению с показанным на рис. 3.4.19 площадью и требуемым обслуживающим персоналом;
- создания перспективного комплекса для приёма цифрового ТВ-сигнала с борта КА в «S» и «Ku» диапазонах;
- разработки принципиально новых алгоритмов посимвольной синхронизации в радиолиниях «борт–Земля», основанных не на предсказании, а на вычислении положения очередного значения вектора констелляционной диаграммы с учётом апостериорной информации об уже обработанных символах (см. раздел 2.5). Применение такого подхода уже позволило повысить помехоустойчивость на 3...4 дБ к используемому ранее подходу. Это обеспечило уверенный приём телевизионных сигналов с борта МКС даже при нахождении объекта за линией горизонта по уровню минус 1...2 градуса.

3.5. Телевизионная система биоспутника БИОН-М

Научная программа «БИОН», начатая ещё в 1973 г., предназначена для проведения комплексных физиологических, морфологических, биохимических, генетических исследований на животных и растительных организмах в полётах специализированных спутников [221]. Важная роль в этой программе, в частности для БИОН-М № 2, отведена телевизионной системе, являющейся основой научной аппаратуры «Теленаука». На новом «биоспутнике» в 2020 г. в космос на один месяц отправятся 75 мышей. Основная задача учёных – повторить «Бион-М» № 1 в новых условиях. Высота орбиты нового спутника около 1 тыс. км, что практически в 2 раза выше, чем у первой модели и в 2,5 раза выше орбиты МКС. «Бион-М» № 2 будет находиться в пределах радиационных поясов Земли, но, несмотря на это, уровень радиации на этой орбите будет примерно в 10 раз выше, чем на первом «Бионе».

Научная аппаратура «Теленаука» предназначена для регистрации и накопления видеоинформации о состоянии биообъектов на борту космического аппарата (КА), а также сбора цифровой программно-телеметрической информации с последующей передачей её по радиоканалу на наземные средства приёма. Состав научной аппаратуры (НА) «Теленаука» представлен в табл. 3.5.1 Архитектуру телевизионной системы НА «Теленаука» в целом и взаимодействие с основными системами КА иллюстрирует рис. 3.5.1.

Таблица 3.4.1. Состав научной аппаратуры «Теленаука»

Подсистема, устройство		Шифр,	Кол-во, шт.
1. Подсистема видеорегистрации, сбора и накопления видеоинформации		ПВСНВ	5
1.1.	Камера цифровая (в каждой ПВСНВ)	БМ-102	5
1.2.	Блок видеорегистрации: <ul style="list-style-type: none">• блок накопления и сжатия видеоинформации,• контроллер	БМ-101	1
2. Подсистема передачи накопленной информации на наземные средства		ППНИ	1
2.1	Блок управления научной аппаратурой ТЕЛЕНАУКА	БМ-103	1
2.2	Радиопередатчик	БМ-104	1
2.3	Антенно-фидерное устройство (АФУ)	БМ-105	1

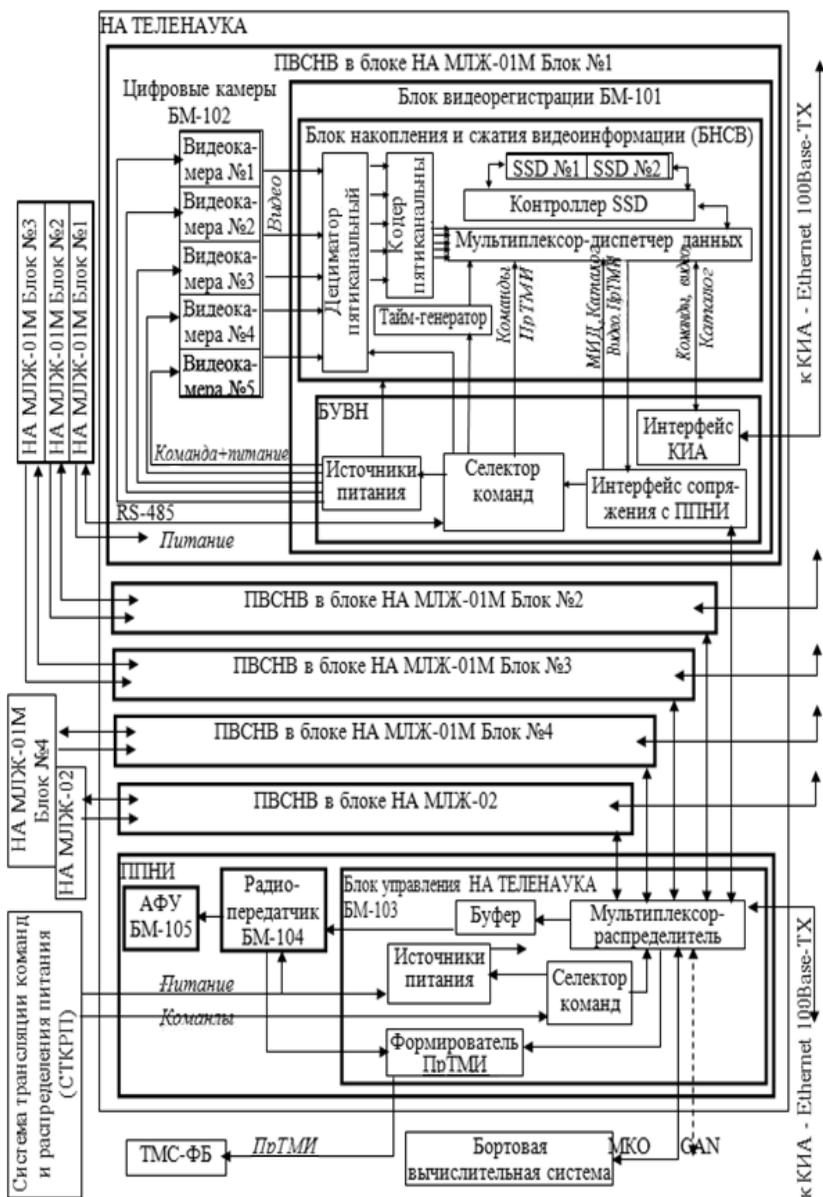


Рис. 3.4.1. Схема взаимодействия между составными частями научной аппаратуры «Теленаука» и системами КА

Подсистемы видеорегистрации, сбора и накопления видеоинформации (ПВСНВ, №№ 1–5) включают 5 видеокамер и блок видеорегистрации (рис. 3.5.2).



Рис. 3.5.2. Архитектура видеоканала НА «Теленаука»

ТВ камеры обеспечивают получение изображений биообъектов в замкнутом объёме (рис. 3.5.3) при дневном освещении (в режиме «день» включены белые светодиоды) и при инфракрасном освещении (в режиме «ночь» включены инфракрасные светодиоды). Переключение режимов осуществляется по команде от научной аппаратуры жизнеобеспечения.



Рис. 3.5.3. Сюжет, контролируемый одной ТВ камерой; изображение (а), лабораторные испытания (б)

В зависимости от режима камера БМ-102 формирует сигналы цветного телевидения (режим «день») или чёрно-белого (режим «ночь»). Формат получаемого изображения составляет 1280×720 пикселей при прогрессивном разложении. Частота кадров выбирается по команде и составляет 30 Гц или 10 Гц. Научная аппаратура «Теленаука» должна работать в следующих режимах:

1. Запись сжатых потоков $1280 \times 720p$ с частотой кадров 30 Гц от 5 ТВ камер с наилучшим качеством (6,75 Мбит/с). Время записи видео от БИОС – 1 месяц полета + 1 сутки до полёта и одни сутки после полёта). Объём накопленной видеoinформации – 4,1 Тбайта;

2. Запись сжатых потоков 1280×720 с уменьшенной частотой кадров 10 Гц от 5 ТВ камер (2,25 Мбит/с). Суммарное время записи от всех БИОС – 96 часов. Объём накопленной видеoinформации – 486 Гбайта;

3. Передача по радиоканалу выбранных видеофрагментов со скоростью 8 Мбит/с. Время передачи – до 15 мин. Число сеансов – от 90 (3 раза в сутки) до 480 (16 раз в сутки).

На рис. 3.5 4 представлены характеристики спектральной чувствительности используемого матричного фотоприёмника фирмы *OnSemiconductor AR0134*.

В ближней инфракрасной области спектра (800...1000 нм) характеристики спектральной чувствительности цветоделённых каналов практически одинаковы. Это позволило построить камеру «день»/«ночь» без использования устройства механического перемещения фильтра инфракрасной отсечки (*infra-redcutfilter*).

Рис. 3.5.4 показывает, что при включении белых светодиодов инфракрасное излучение отсутствует и возможно получение высококачественного (без цветовых искажений) цветного изображения без использования фильтра инфракрасной отсечки. В то же время при включении ИК светодиодов модуляция видеосигнала, вызванная нанесённым фильтром Байера будет отсутствовать, т. к. при наблюдении ровного поля сигналы от всех пикселей будут одинаковы, и не будет потери разрешающей способности, свойственной цветным ТВ камерам относительно чёрно-белых ТВ камер с тем же числом пикселей.

Спутник Бион № 2 на новом методологическом и технологическом уровне (см. рис. В.4) продолжит космобиологические исследования, начало которым было положено ещё при полёте собачек Белки и Стрелки (см. рис. 1.25) и продолжено серией спутников Бион с 1973 г. по 2007 г. Научная программа по проекту Бион продолжит исследования по гравитационной физиологии на животных в интересах разработки фундаментальных основ

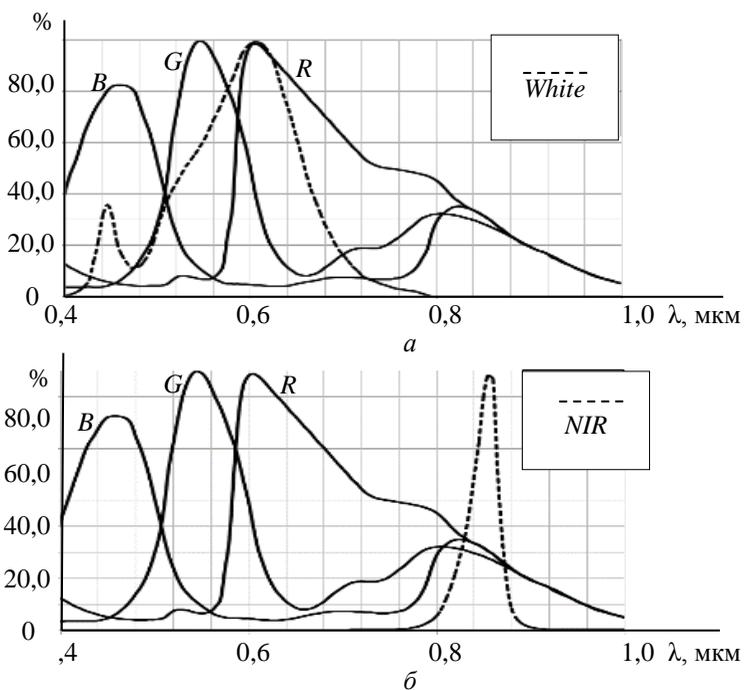


Рис. 3.5.4 Спектральные характеристики цветodelённых каналов и светодиодов подсветки в режиме: «день» – *a*; «ночь» – *б* создания новых технологий обеспечения жизнедеятельности человека в условиях невесомости и открытого космического пространства с учётом радиационной безопасности.

3.6. Телевизионная система скафандра Орлан-2

Скафандр для внекорабельной деятельности космонавтов является сложнейшим инженерным изделием. Одним из важных его элементов является телевизионная система, которая располагается на шлеме скафандра. Телевизионная система скафандра последнего поколения «Орлан-2» выполнена в виде моноблока, включающего две ТВ камеры, осветители и радиопередатчик (рис. 3.6.1).

Основные характеристики системы «Орлан-2» даны в табл. 3.6.1. Упрощённая структурная схема телевизионной системы «Орлан-2» представлена рис. 3.6.2.



Рис. 3.6.1. Моноблок скафандра «Орлан-2», внешний вид

Таблица 3.6.1. Основные характеристики системы «Орлан-2».

Формат изображения, эл.	720×576
Режим развертки	прогрессивный
Разрешение (в центре),ТВЛ;	480...500
Кадровая частота, Гц	25
Углы обзора, $V_H \times V_L$, град	47×57
Диапазон освещённости, лк	30...130000
Выходной сигнал	PAL



Рис. 3.5.2. Структурная схема телевизионной системы Орлан-2

Блок фотоприёмника реализован на КМОП-матрице *EV76C560ACT-EQV* (1280×1024 элементов); рабочая зона имеет формат 720×576 элементов; объектив *KOWA LM4NCL* обеспечивает требуемые углы обзора и разрешающую способность 480...500 ТВЛ в центре (по таблице ТИТ-0249).

Автоматическая регулировка времени накопления и внешняя подсветка обеспечивают широкий диапазон освещённости 30...130000 лк. Блок работает в режиме прогрессивной развёртки 720×576.

Сигнал с блока фотоприёмника параллельным 8-ми разрядным кодом передаётся на *MPEG*-кодер и далее на модулятор передающего устройства.

На приёмном (бортовом) устройстве сигнал декодируется и преобразуется в стандартный сигнал формата *PAL*.

Для получения информации о цвете видеоданные проходят через блок декодирования (*ДВ*). На выходе блока формируются восьмиразрядные сигналы яркостной и цветоразностных составляющих. В блок декодирования («дебайеринга») входит блок гамма-коррекции (*ГК*), предназначенный для корректировки яркостной составляющей в зависимости от уровня входного сигнала.

Одновременно с блоком декодирования данные с матрицы, а также кадровый импульс поступают на блок автоматической регулировки времени накопления (*АРВН*). Входящий сигнал анализируется по всей протяженности кадра и в случае отклонения значения от установленных допустимых значений яркости производится загрузка корректирующих значений времени накопления в соответствующие регистры матрицы. Блок *АРВН* производит также управление блоком подсветки (*БП*), который запускается в случае недостаточности регулировки времени накопления для получения изображения приемлемого качества. Для обеспечения устойчивости системы управления автоматического включения подсветки в алгоритм управления заложен гистерезис.

После прохождения декодирования сигнал в виде яркостного и цветоразностных составляющих поступает в блок выходного формирователя (*ВФ*). Для осуществления последующей операции кодирования данные формируются в соответствии со стандартом *ITU-RBT.1358*.

3.7. Метеорологические приёмные комплексы

Как и в период становления космического телевидения (см. раздел 1.2), НИИ телевидения принимает активное участие в разработке и модернизации приёмных комплексов метеорологической информации, создавая стационарные (напр., «Сюжет-МФ») и мобильные (напр., «Сюжет-МБ») пункты приёма, поставив пользователям более 300 комплектов. Их применение весьма актуально для удалённых районов страны, воинских частей, кораблей гражданского и военного флота (рис. 3.7.1–3.7.3) [263].

Мобильный автономный пункт приёма космической информации «Сюжет-МБ» (МАППИ) осуществляет оперативный приём, тематическую обработку и анализ гидрометеорологической целевой информации от различных космических аппаратов в форматах:

- *FAX*, *RTTY* в КВ диапазоне 1,5...30,0 МГц (приём погодных/факсимильных карт);
- *LRPT* (цифровые снимки с КА) в МВ диапазоне 137...138 МГц;
- *APT* (аналоговые снимки с КА) в МВ диапазоне 137...138 МГц;
- Цифровые снимки в форматах *LRIT*, *HRIT*, *HRPT* в ДМВ диапазоне 1690...1710 МГц;
- Аналоговые снимки в формате *WEFAX* в ДМВ диапазоне 1690...1710 МГц.

Основные эксплуатационные характеристики мобильного автономного пункта приёма космической информации «Сюжет-МБ»:

- время развертывания 20 мин;
- потребляемая мощность МАППИ не более 500 Вт
- питание комплекта аппаратуры – линейным напряжением однофазной сети переменного тока 220 В (+5/–10%) частотой 50 Гц ($\pm 2\%$) или от аккумуляторов (через адаптер) постоянного тока 24 В.
- гарантийный срок эксплуатации 7 лет, срок службы 10 лет.



Рис. 3.7.1. Мобильный автономный пункт приёма космической информации «Сюжет-МБ» на ледокольном судне «Магадан»



Рис. 3.7.2. Следящая за КА антенна ДМВ (HRPT, CHRPT, WEFAX) стационарного приёмного пункта «Сюжет-МФ» на позиции

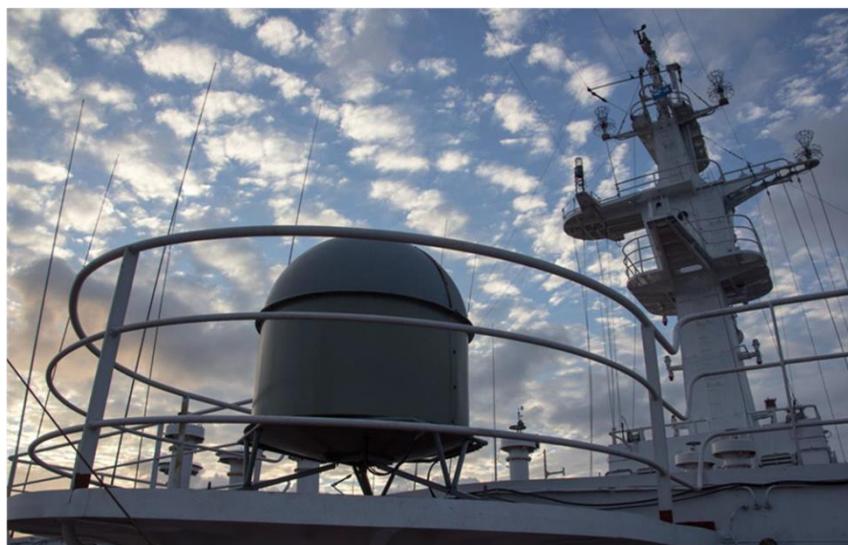


Рис. 3.7.3. Следящая за КА антенна ДМВ (HRPT, CHRPT, WEFAX) комплекса «Сюжет-МБ» на океанографическом исследовательском судне «Адмирал Владимирский»

Программное обеспечение (ПО) комплексов [263] предназначено для приёма (рис. 3.7.4, 3.7.5) и тематической обработки метеорологической информации с космических аппаратов (КА) для использования в составе мобильного, стационарного и морского базирования пунктов приёма и обработки космической метеорологической информации, а также осуществление приёма факсимильных метеорологических карт в формате *FAX* и телеграмм в формате *RTTY* в диапазоне коротких волн (КВ). ПО состоит из независимых программных блоков: «Приёмник», «АРМ Актоника», «*FaxMap*», «*RTTY*» и «*HSDR*».

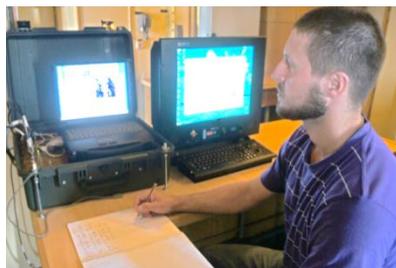


Рис. 3.7.4. Приём метeosнимка аппаратурой «Сюжет-МБ» создателями системы в НИИ телевидения (слева) и оператором на океанографическом исследовательском судне «Адмирал Владимирский»



Рис. 3.7.5. Вид меню «Место» (а) и «Ротор/Радио» (б) для ввода координат, высоты и названия пункта приёма

Программный блок «Приёмник» обеспечивает:

- автоматический приём информации с КА типа *NOAA*, *Meteor*, *Meteosat* в форматах *MHRPT*, *HRPT*, *LRPT*, *APT*, *WEFAX* в различных спектральных диапазонах (рис. 3.7.6) в соответствии с заданными настройками приёма;

- автоматическую предварительную обработку информации, полученной с КА (нанесение координатной сетки, названий населённых пунктов и т. п.);
- автоматическую передачу предварительно обработанной информации в центр хранения и обработки метеорологической информации через сеть типа Интернет в соответствии с заданными настройками передачи.

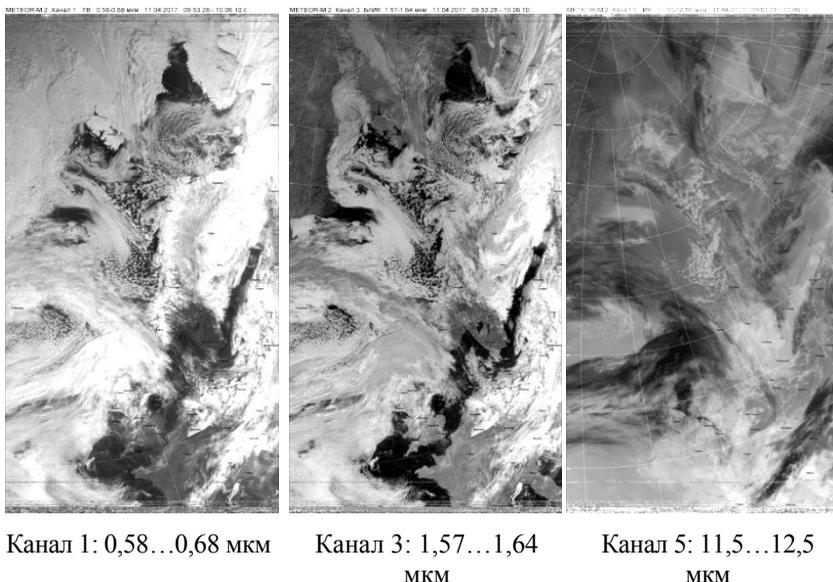


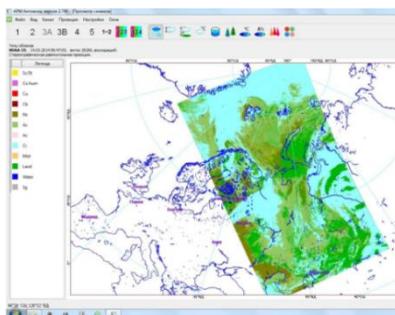
Рис. 3.7.6. Одновременные изображения облачного покрова над Европой в различных спектральных диапазонах

Программный блок «АРМ Актомика» обеспечивает:

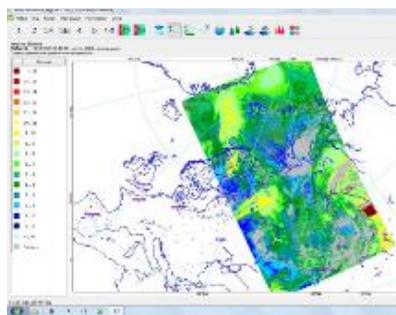
- автоматическую тематическую обработку информации, полученной с КА и других источников исходной информации; тематическая обработка информации, благодаря возможности сравнения изображений облачного покрова в различных спектральных диапазонах, позволяет построить карты с цветовым разделением кластеров для типа облаков, их толщины, верхней границы облачности и температуры этой границы (рис. 3.7.7).
- автоматическую передачу исходной и обработанной информации в центр хранения и обработки метеорологической информации через сеть типа Интернет в соответствии с заданными настройками передачи;
- получение исходной информации из центра хранения и обработки метеорологической информации через сеть типа Интернет для

её последующей обработки и использования оператором-метеорологом;

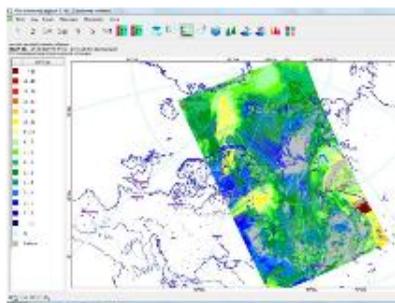
- визуализацию и печать исходной и обработанной информации для обеспечения работы оператора-метеоролога.



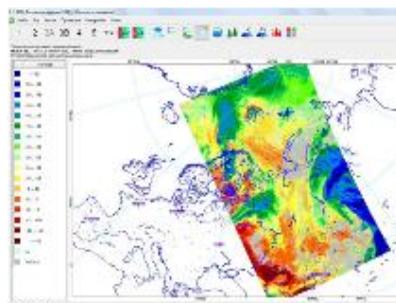
Типы облаков



Толщина облаков



Высота верхней границы
облачности



Температура верхней границы
облачности

Рис. 3.7.7. Результаты тематической обработки спутниковой метеоинформации – карты параметров облачности над севером Евразии

Программный блок «*FaxMap*» обеспечивает автоматический приём и сохранение факсимильных метеорологических карт в формате *FAX* в диапазоне коротких волн (КВ).

Программный блок «*RTTY*» обеспечивает автоматический приём и сохранение телеграмм в формате *RTTY* в диапазоне коротких волн (КВ).

Программный блок «*HSDR*» обеспечивает управление радиоприёмником КВ диапазона.

СПО используется на персональной электронно-вычислительной машине (ПЭВМ), которая должна быть класса *Intel® Core™ 2CPU* с тактовой частотой не ниже 1,6 ГГц, объёмом памяти оперативного запоминающего устройства не менее 2,0 Гб, объёмом

видеопамяти не менее 512 Мб и жёсткого магнитного диска – не менее 250 Гбайт. На ней должна быть установлена операционная система *ОС Windows XP, 7, MCBC 3.0*. Для функционирования программы требуется *QT* версии не ниже 4.6.

Развитие систем приёма метеоинформации со среднеорбитальных КА стимулировано повышением научной значимости антарктического региона (рис. 3.7.8) и активным освоением Арктики, обеспечение которых качественной метеоинформацией с геостационарных КА нереально в силу малых углов наблюдения, ведущих к геометрическим искажениям и трудностям привязки изображений к местности.

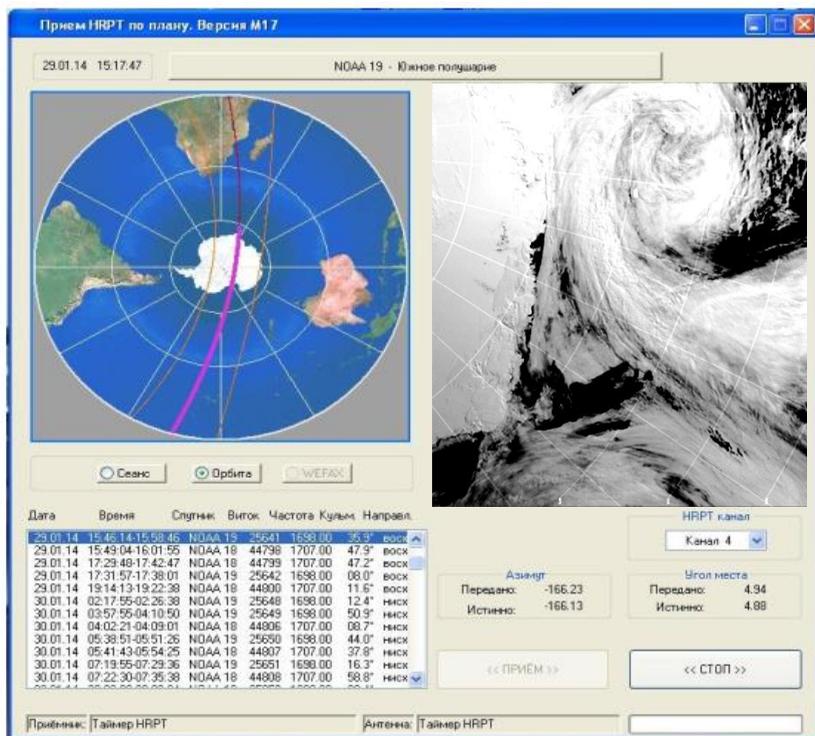


Рис. 3.7.8. Отображение текущего положения спутника в южном полушарии и полученное изображение циклонов и льдов Антарктиды

3.8. Тренажёрные комплексы для космонавтов

НИИ телевидения, как и в период становления космического телевидения (см. раздел 1.2), принимает активное участие в разработке и модернизации телевизионных систем, используемых в тренажных комплексах и тренажёрах [222] для подготовки космонавтов в ФГБУ «Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов им. Ю. А. Гагарина» [223]. В частности, поддерживается работоспособность и модернизируются следующие телевизионные комплексы (ТВК) [224]:

- ТВК «Сапфир» (рис. 3.8.1) в составе комплексного тренажера ТДК-7СТ3, обеспечивающего подготовку экипажей МКС и космонавтов (рис. 3.8.2, 3.8.3);
- ТВК «Фианит» (рис. 3.8.4, 3.8.5) в составе комплексного тренажера ТДК-7СТ4, обеспечивающего подготовку экипажей МКС и космонавтов;
- ТВК «Агат» (рис. 3.8.6) в составе тренажера ТПК «Союз ТМА» ТДК-7СТ5;
- ТВК «Гранит» в составе комплекса тренажеров российского сегмента МКС.

Комплексные тренажёры «ТДК-7СТ3» и «ТДК-7СТ4» предназначены для подготовки космических экипажей к управлению транспортным кораблем «Союз» на всех участках полёта, в штатных режимах и в аварийных ситуациях, в том числе с использованием скафандров, включая: предстартовую подготовку транспортного корабля; выведение на орбиту; орбитальное маневрирование (в т. ч. сближение, причаливание, стыковка, полёт в связке с МКС, расстыковка с МКС); спуск с орбиты; приземление и проведение заключительных операций после посадки.

Комплексные тренажеры ТДК-7СТ3 и ТДК-7СТ4 проходили модернизацию для подготовки космонавтов по кораблям серий «Союз ТМ», «Союз ТМА», «Союз ТМА-М» различных версий. В настоящее время ведутся работы по их модернизации под ТПК «Союз МС».

В 2015–2016 годах специалистами НИИ телевидения разработан и поставлен в ЦПК новый ТВК «Фианит 2», который в перспективе заменит ТВК «Фианит» в составе комплексного тренажера ТДК-7СТ4. В ТВК «Фианит 2» реализованы технические решения, основанные на последних достижениях науки и техники в области формирования и передачи телевизионной информации, в частности,

использование нового стандарта в цифровом телевидении *3G-SDI* для формирования телевизионного сигнала, а для его передачи – оптоволоконных линий связи.



а *б*
Рис. 3.8.1. ТВК «Сапфир» (*а*) и пульт контроля и управления тренажера ТПК «Союз» ТДК-7СТЗ с ТВК «Сапфир» (*б*)



Рис. 3.8.2. Комплексный тренажер ТДК - 7СТЗ;
аналогичный вид имеют комплексные тренажеры
ТПК «Союз» ТДК-7СТ4, ТДК-7СТ5



Рис. 3.8.3. Рабочее место космонавта комплексных тренажеров ТПК «Союз» ТДК-7СТ3, ТДК-7СТ4, ТДК-7СТ5

Специализированный тренажёр динамических режимов полёта ТПК «Союз» ТДК-7СТ5 представляет собой сложный полунатурный моделирующий комплекс, построенный с использованием полноразмерных макетов обитаемых отсеков ТПК «Союз». Тренажёр с ТВА «Агат» обеспечивает моделирование работы всех необходимых бортовых систем и движения корабля, а также визуальную модель обстановки, наблюдаемой экипажем в оптических и телевизионных средствах наблюдения спускаемого аппарата корабля.



Рис. 3.8.4. ТВК «Фианит» (а) и пульт контроля и управления комплексного тренажера ТДК-7СТ4 с ТВК «Фианит» (б)



Рис. 3.8.5. Специалисты НИИ телевидения при настройке ТВК «Фианит 2»



Рис. 3.8.6. ТВК «Агат»

Основным элементом предлагаемой системы отображения для модернизации телевизионной аппаратуры «Гранит» тренажеров российского сегмента МКС является программный «микшер-коммутатор» на базе современного графического акселератора [225]. Это обеспечивает обработку одновременно нескольких видео потоков чересстрочного формата в реальном времени, что даёт возможность масштабировать подобные видео без искажений. Использование стандартных аппаратных средств позволяет снизить стоимость системы и повысить её ремонтпригодность за счёт широкого распространения аппаратных компонентов и их взаимозаменяемости. Программное решение обеспечивает удалённое управление с возможностью одновременного предпросмотра видеоисточников и результата микширования, которое может осуществляться с управляющей ЭВМ или планшета.

Кроме работ по обеспечению работоспособности ТВА «Сапфир», «Фианит», «Агат» и «Гранит» в рамках модернизации тренажеров запланирована СЧ ОКР по разработке и изготовлению ТВА «Яшма» для комплексного тренажёра ТДК-7СТЗ. В этой аппаратуре планируется использование технических решений, основанных на последних достижениях науки и техники в области формирования и передачи телевизионной информации на основе цифровых технологий.

3.9. Развитие телевизионной инфраструктуры космодромов

Одной из важнейших составляющих космического телевидения является телевизионная инфраструктура космодромов, значение которой в последние годы значительно возросло: телевизионная информация (ТИ) играет всё более важную роль в обеспечении задач, решаемых космодромами. Наиболее значимыми областями использования телевизионных систем на космодромах являются [41]:

- обеспечение контроля выполнения технологических операций при сборке, испытаниях, подготовке и запуске ракет-носителей, космических кораблей и межорбитальных станций;
- мониторинг состояния объектов инфраструктуры космодрома;
- получение видеоинформации с КА и других летательных аппаратов:
 - отображение наиболее важной информации в графической форме на рабочих местах должностных лиц космодрома и операторов технологических расчётов и дежурных смен;
 - обеспечение охраны космодрома и его объектов.

На существующих космодромах телевизионная инфраструктура создавалась эволюционным путём последовательно по мере развития основных комплексов и понимания возрастающей роли телевизионных систем. В отличие от этого на космодроме «Восточный» телевизионная инфраструктура создаётся сразу по единому плану исходя из современных требований и с использованием новейших технологий.

Основными элементами телевизионной инфраструктуры космодрома «Восточный» являются (рис. 3.9.1):

1. Системы технологического телевидения основных комплексов космодрома (стартовых комплексов, технических комплексов, командно-измерительного комплекса, заводов по производству и хранению компонентов топлива, аэродромного комплекса, объектов железнодорожных и автомобильных коммуникаций и т. п.);
2. Цифровой комплекс коммутации и распределения ТИ [226];
3. Система видеомониторинга [227];
4. Передвижные телевизионные станции [228];
5. Приёмный телевизионный комплекс (для обмена ТИ с КА);
6. Беспилотные летательные аппараты с телевизионной аппаратурой;
7. Телевизионные охранные системы.

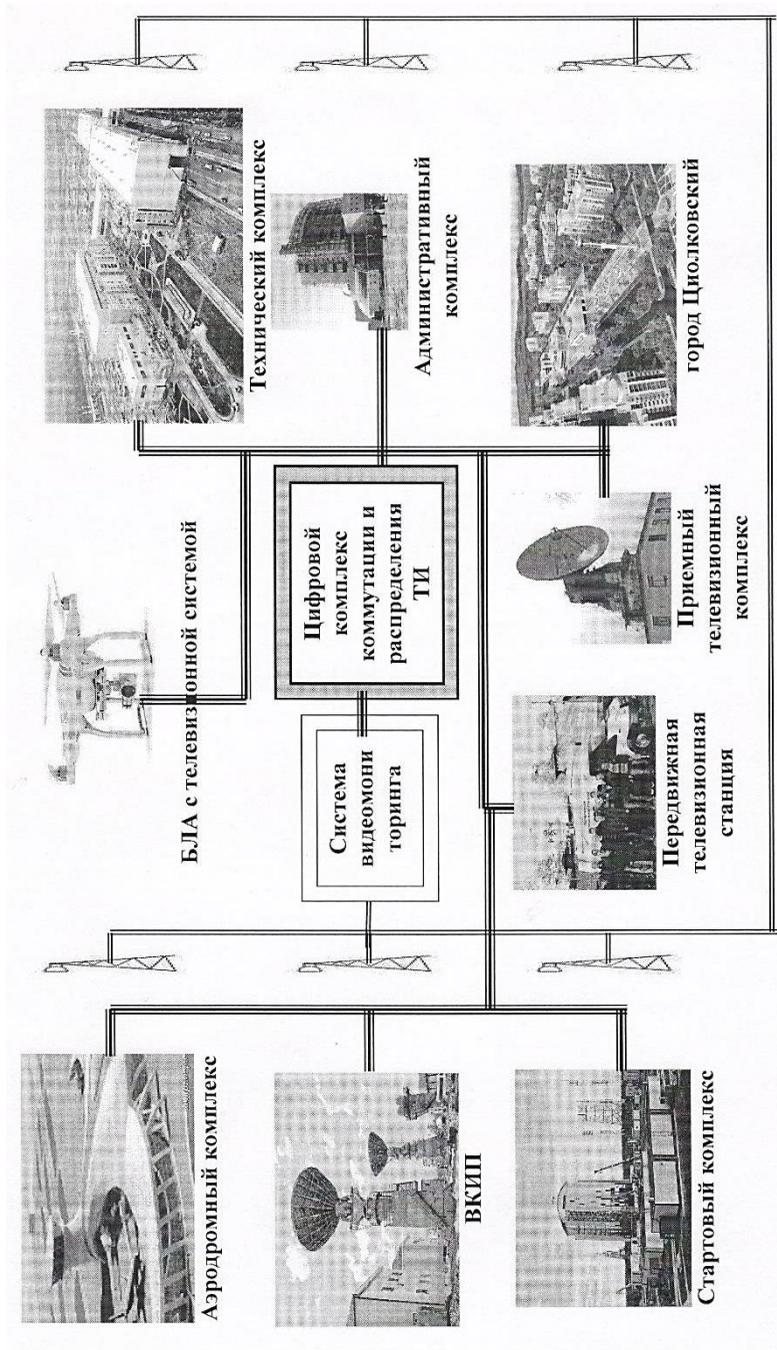


Рис. 3.9.1. Телевизионная инфраструктура космодрома «Восточный»
 (на рисунке не показаны телевизионные системы безопасности, имеющиеся на каждом комплексе космодрома)

В данном разделе будут рассмотрены только те элементы телевизионной инфраструктуры космодрома «Восточный», которые разрабатывались при участии авторов монографии, разработка которых завершена и которые были использованы при строительстве космодрома, подготовке и выполнении первого пуска ракеты-носителя «Союз-2-1а» 28 апреля 2016г.

Цифровой комплекс коммутации и распределения телевизионной информации (ЦКК и РТИ) является ядром телевизионной инфраструктуры космодрома «Восточный» и выполняет следующие основные функции [226]:

- приём ТИ от всех источников ТИ на космодроме (технологическое телевидение, система видеомониторинга, приёмный ТВ-комплекс, передвижная телевизионная станция, спутниковое телевидение, бортовое телевидение ракет-носителей);
- согласование поступающей ТИ по скорости, типу и параметрам алгоритма кодирования с параметрами аппаратуры ЦКК и РТИ, аппаратуры отображения ТИ у внешних и внутренних потребителей и с характеристиками каналов связи;
- коммутация поступающей ТИ внешним и внутренним потребителям;
- управление правами доступа потребителей к ТИ;
- отображение ТИ у потребителей в мульти- и моноэкранных режимах;
- мониторинг состояния и управление параметрами и режимами работы основных элементов ЦКК и РТИ;
- автоматический контроль качества передачи ТИ в ЦКК и РТИ;
- запись и хранение поступающей ТИ.

В состав опытного образца ЦКК и РТИ, обеспечивающего выполнение задач в условиях работы объектов так называемого пускового минимума, входят (рис. 3.9.2):

- четыре комплекта оборудования аппаратуры сопряжения с источниками ТИ (АСИТИ);
- один комплект оборудования аппаратуры коммутации и распределения ТИ (АКИРТИ);
- один комплект оборудования аппаратуры автоматизированного рабочего места оператора (АРМО);

20 комплектов оборудования аппаратуры отображения ТИ (АОТИ).

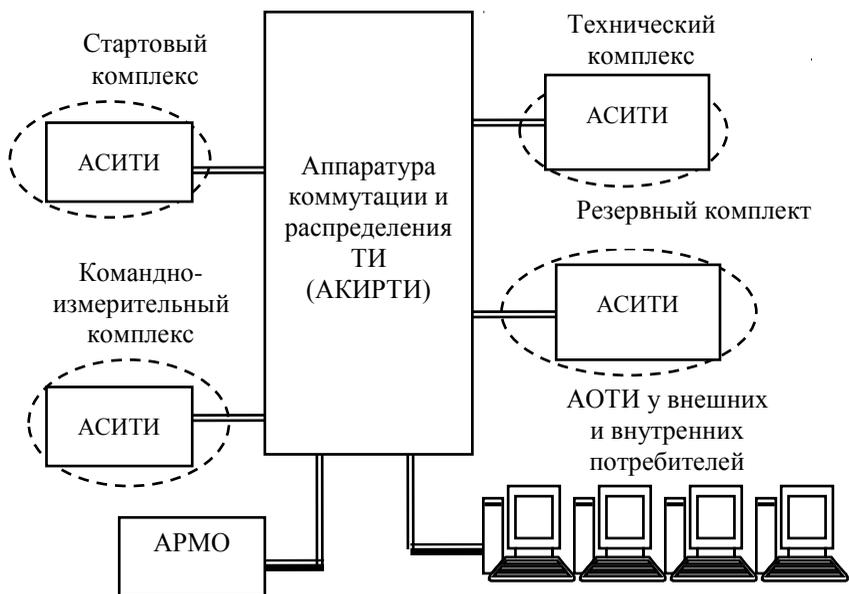


Рис. 3.9.2. Структурная схема ЦКК и РТИ

Базовыми протоколами формирования, обработки и обмена ТИ в ЦКК и РТИ являются протоколы, построенные на основе *IP*-протоколов. Обмен ТИ между объектами космодрома осуществляется с помощью специально развёрнутой сети передачи данных (СПД). В штатном режиме СПД космодрома строится на основе опорной волоконно-оптической сети. Топология сети – звезда.

Технология передачи ТИ всем внутренним потребителям – мультикаст: каждому частному потоку ТИ от конкретной видеокамеры или сервера присваивается свой мультикастинговый *IP*-адрес (из диапазона адресов, зарезервированных под мультикаст) и весь пакет рассылается всем получателям ТИ. В зависимости от информации, поступающей из АРМО от подсистемы специального программного обеспечения (СПО), управляющей правами доступа к ТИ, каждому получателю ТИ устанавливается перечень источников ТИ, которые он может просматривать на своей АОТИ.

Аппаратура сопряжения источников ТВ-информации (АСИТИ) имеет назначение:

- согласование ТИ, поступающей от источников ТИ космодрома (систем технологического ТВ, ПТС, и т.п.) по алгоритму кодированию и скорости передачи информации с форматами, принятыми в ЦКК и РТИ;

- передача согласованной информации в аппаратуру коммутации и распределения ТИ (АКИРТИ) ЦКК и РТИ;
- согласование ТВ-информации, поступающей от АКИРТИ ЦКК и РТИ с форматами, принятыми в системах информационного обеспечения внутренних и внешних потребителей ТИ;
- передача согласованной информации в системы информационного обеспечения внутренних и внешних потребителей ТИ;
- формирование, отображение и передача в АКИРТИ ТИ от тестовой видеокамеры;
- формирование, отображение и передача в АКИРТИ специальных измерительных ТВ-сигналов.

Структурная схема АСИТИ приведена на рис. 3.9.3, где: ВКТ – видеокамера тестовая; КС – коммутатор сетевой; КМ – консоль с монитором; ГИТС – генератор измерительных ТВ-сигналов; ИБП – источник бесперебойного питания; БУР – блок управляемых розеток; ОМК – оптический медиаконвертор; ШУ – шасси управляемое для ОМК.

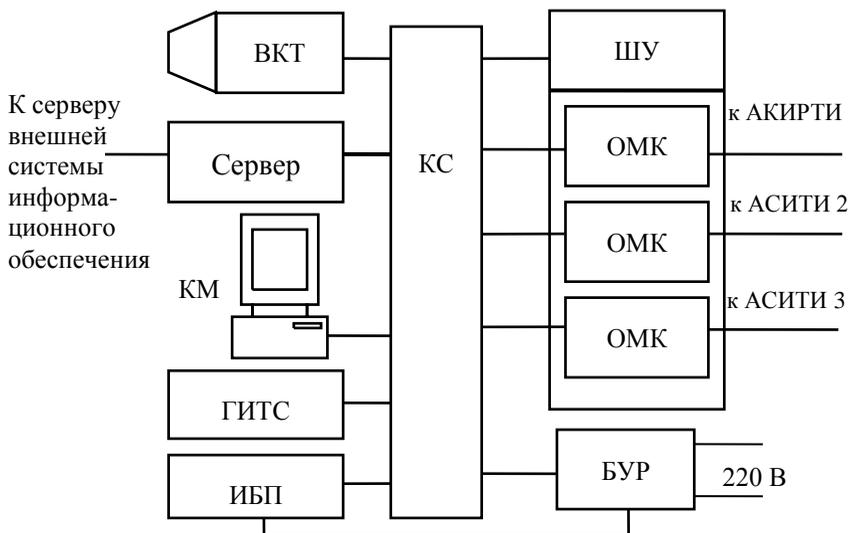


Рис. 3.9.3. Структурная схема АСИТИ

Внешний вид опытного образца АСИТИ, смонтированного в 19-ти дюймовую стойку высотой 24U, показан на рис. 3.9.4, где 1 – оптический кросс; 2 – коммутатор сетевой 12-ти портовый уровня L2; 3 – шасси управляемое с тремя оптическими медиаконверторами; 4 – консоль с монитором; 5 – сервер с установленным специальным

программным обеспечением (СПО); 6 – генератор измерительных телевизионных сигналов; 7 – источник бесперебойного питания.

Установленное на сервере СПО обеспечивает:

- согласование параметров ТИ, поступающей с объекта, с параметрами ТИ в ЦКК и РТИ;
- преобразование ТИ, передаваемой в сеть объекта, к виду, используемому в сети технологических камер;

- просмотр на мониторе КМ всей ТИ, проходящей через АСИТИ.

Коммутатор сетевой КС объединяет поступающие на него *IP*-пакеты от всех источников ТИ в один общий поток. При этом *IP*-пакеты от различных источников ТИ отличаются своими *IP*-адресами.

Аппаратура коммутации и распределения ТВ-информации (АКИРТИ) выполняет следующие функции:

- принимает ТВ-информацию от всех источников ТИ (АСИТИ, ПТС, комплекса для приёма аналогового и цифрового ТВ-сигнала с борта КА, системы приёма и трансляции видеoinформации с площадок космодрома, приёмника вещательного спутникового телевидения);

- формирует и отправляет внутренним потребителям объединённый мультикастинговый поток, содержащий ТИ от всех актуальных на данный момент источников;

- выдает внутренним потребителям информацию, управляющую правами доступа данного потребителя к информации, содержащейся в объединённом мультикастинговом потоке;

- формирует, согласовывает (по формату и скорости передачи) и отправляет внешним потребителям заказанную ТВ-информацию.

Внешний вид стойки АКИРТИ, размещенной в 19-ти дюймовом шкафу высотой 42U, представлен на рис. 3.9.5, где: 1 – два коммутатора сетевых (по 48 гигабитных порта в каждом, уровня L3), включенных в стек; 2 – шасси управляемое с оптическими медиа-конверторами; 3 – консоль с монитором (функционально в состав АКИРТИ не входит, служит для удобства настройки оборудования размещённого в рядом стоящих стойках АКИРТИ и АРМО); 4 – оптический кросс; 5 – профессиональный приёмник вещательного спутникового телевидения со стримером, который является источником ТИ для ЦКК и РТИ, функционально в состав АКИРТИ не входит, размещён в стойке АКИРТИ для удобства монтажа и настройки ЦКК и РТИ; 6 – декодер/транскодер транспортного потока; 7 – анализатор телевизионных сигналов (функционально входит в состав АРМО); 8 – декодеры/транскодеры; 9 – источник бесперебойного питания с аккумуляторной батареей.

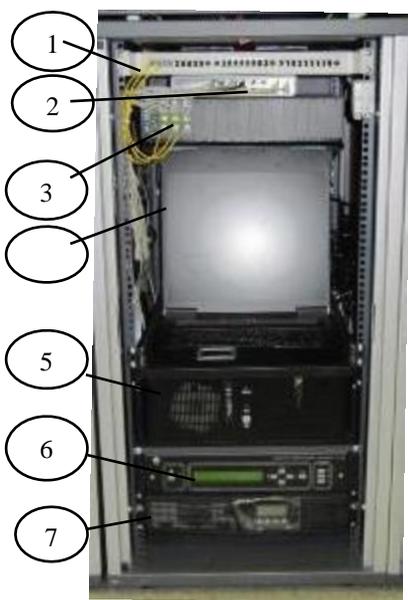


Рис. 3.9.4. Внешний вид стойки АСИТИ

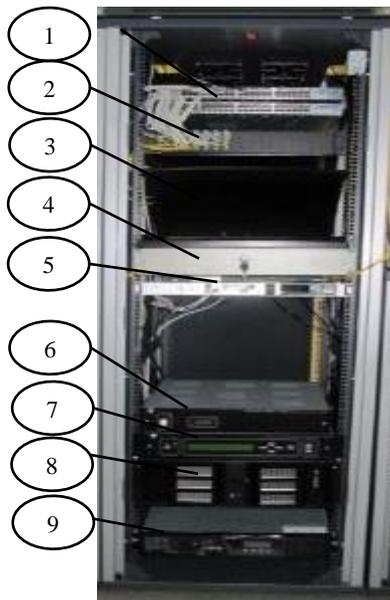


Рис. 3.9.5 Внешний вид стойки АКИТРИ

Структурная схема АКИТРИ приведена на рис. 3.9.6

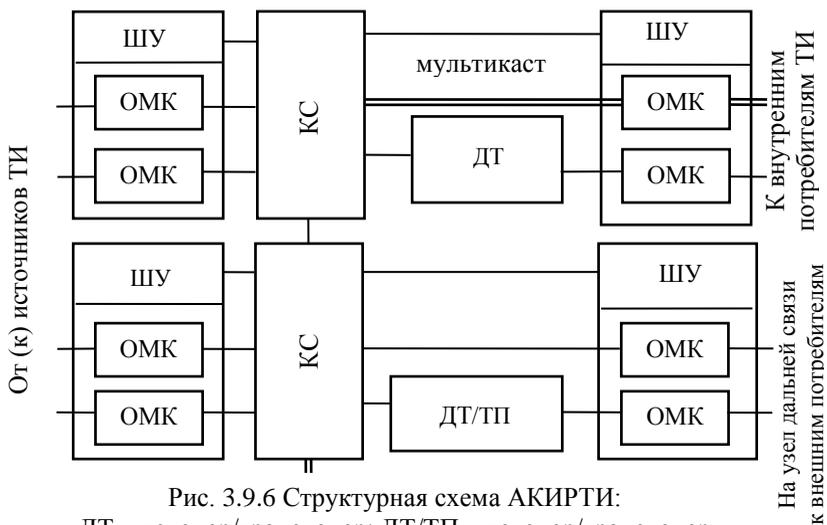


Рис. 3.9.6 Структурная схема АКИТРИ:
 ДТ – декодер/транскодер; ДТ/ТП – декодер/транскодер

Аппаратура автоматизированного рабочего места оператора (АРМО) является центральным элементом ЦКК и РТИ. Основные задачи, решаемые аппаратурой АРМО:

- управление параметрами и режимами работы всех основных элементов ЦКК и РТИ;
- сбор и отображение информации о состоянии сети передачи данных и основных элементов ЦКК и РТИ;
- управление формированием объединенного мультикастингового потока ТВ-информации;
- мониторинг состояния и режимов работы основных элементов ЦКК и РТИ;
- управление правами доступа потребителей к ТВ-информации, содержащейся в объединенном мультикастинговом потоке;
- управление формированием ТВ-информации для внешних потребителей;
- запись и хранение поступающей ТВ-информации;
- автоматический контроль качества передачи и обработки измерительных ТВ-сигналов в ЦКК и РТИ.

Структурная схема оборудования АРМО приведена на рис. 3.9.7, где: ТО – табло отображения; КП – компьютер портативный (неттоп); МК – мышь компьютерная; МБ – моноблок; КС – коммутатор сетевой; АИТС – анализатор измерительных телевизионных сигналов; СП – сервер приложений; СБД – сервер базы данных; СХ – сервер хранения; ВР – видеорегистратор.

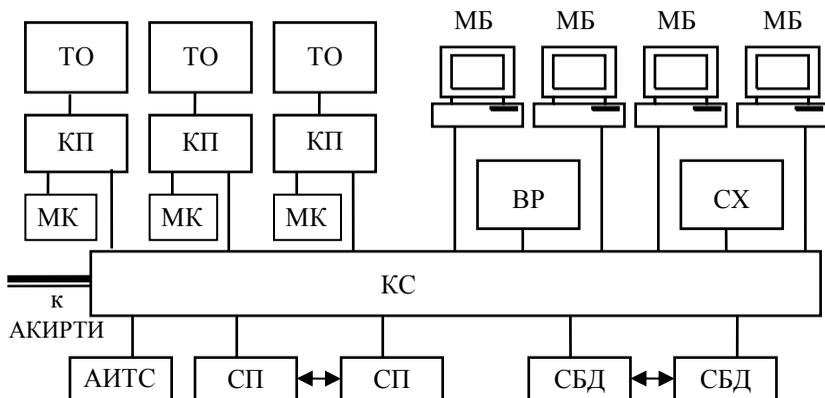


Рис. 3.9.7. Структурная схема аппаратуры АРМО

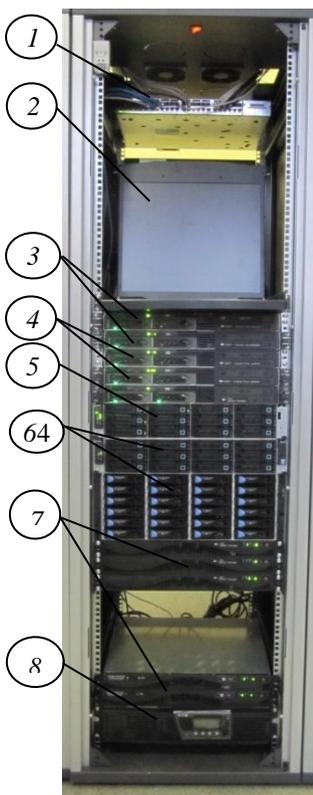


Рис. 3.9.8. Внешний вид стойки АРМО

Специальное программное обеспечение, реализующее все перечисленные выше функции, возлагаемые на аппаратуру АРМО, загружено на 5 серверов, которые с целью обеспечения высокой надёжности функционирования ЦКК и РТИ резервируют и дополняют друг друга.

Оборудование АРМО размещено в телекоммуникационном шкафу (19 дюймов высотой 42U), на столе оператора АРМО (4 сенсорных моноблока) и на стене в аппаратной АРМО (3 больших настенных дисплея с портативными компьютерами).

Внешний вид телекоммуникационного шкафа с серверным оборудованием аппаратуры АРМО приведен на рис. 3.9.8, где 1 – коммутатор сетевой (уровня L2, 24 гигабитных порта); 2 – консоль с монитором (для режима настройки); 3 – серверы приложений; 4 – серверы базы данных; 5 – сервер хранения; 6 – видеорегистратор с расширенным хранилищем данных; 7 – декодеры/транскодеры (функционально входят в состав АКИРТИ):

8 – источник бесперебойного питания с аккумуляторной батареей.

Фотографии стола АРМО и табло отображения представлены на рис. 3.9.9.



Рис. 3.9.9. Рабочее место оператора АРМО на временном узле связи космодрома «Восточный» (на рабочем месте 4 сенсорных видеопросмотровых устройства и 3 табло отображения)

СПО, установленное на серверном оборудовании аппаратуры АРМО, разрабатывалось совместно с ПАО «Новосибирский институт программных систем» [230]; состоит из следующих основных модулей (компонентов):

- модуль управления параметрами и режимами работы основных элементов ЦКК и РТИ;
- модуль мониторинга состояние каналов и всех основных элементов ЦКК и РТИ;
- модуль управления формированием общего мультикастингового потока ТИ, рассылаемого всем пользователям;
- модуль управления правами доступа потребителей к ТИ;
- модуль управления отображением ТИ;
- модуль управления регистрацией ТИ;
- модуль управления формированием ТИ для передачи по каналам дальней связи для внешних потребителей;
- модуль сопряжения ТИ, получаемой от источников ТИ, с аппаратурой и алгоритмами обработки ТИ в ЦКК и РТИ;
- модуль сопряжения ТИ, отправляемой ЦКК и РТИ, с аппаратурой и алгоритмами обработки ТИ у потребителей ТИ;
- модуль хранения текущих настроек ЦКК и РТИ;
- модуль ведения журналов событий и нештатных ситуаций ЦКК и РТИ;
- модуль пользовательского интерфейса.

Управление режимами работы и состоянием элементов ЦКК и РТИ, осуществляемое с АРМО, выполняется с помощью виртуальных панелей и графического интерфейса на сенсорном экране мониторов, компьютерной клавиатуры и компьютерной мыши. В режимах диагностики, мониторинга и управления элементами ЦКК и РТИ мониторы с сенсорными экранами отображают в графической форме текущую информацию о состоянии и режимах работы всех элементов ЦКК и РТИ, наложенную на мнемоническую схему космодрома. Предусмотрен вывод информации с управляющих мониторов на большие табло отображения.

СПО аппаратуры АРМО обеспечивает отображение на мониторах, установленных на рабочем столе оператора АРМО, следующей информации:

- мнемоническое табло с результатами мониторинга состояния элементов аппаратуры и сети ЦКК и РТИ (рис.3.9.10);
- панель управления распределением ТВ-информации потребителям ЦКК и РТИ;

- результатами анализа качества прохождения измерительных ТВ-сигналов по трактам ЦКК и РТИ (с помощью цепочки «Генератор измерительных ТВ-сигналов» – «Анализатор цифровых телевизионных сигналов»);
- графическая и числовая информация о параметрах и режимах работы всех основных элементов ЦКК и РТИ (вызов информации о каком-либо элементе ЦКК и РТИ выполняется нажатием на соответствующий элемент мнемонического табло).

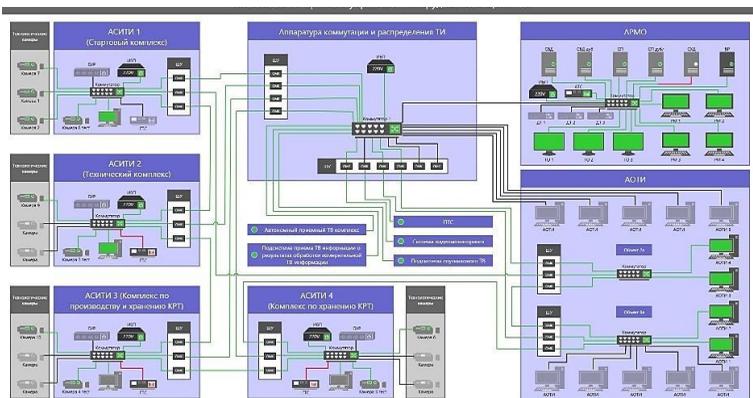


Рис. 3.9.10. Скриншот мнемонического табло подсистемы мониторинга состояния элементов аппаратуры и сети ЦКК и РТИ

Аппаратура отображения телевизионной информации (АОТИ) ЦКК и РТИ представляют собой аппаратно-программный комплекс, состоящий из одного или группы мониторов с соответствующим количеством портативных компьютеров, на которых установлено СПО, обеспечивающее просмотр у потребителя разрешенной ТИ в режимах мульти- и моноэкрана. При этом видеоизображения, формирующие мультиэкран, имеют худшие по сравнению с исходным изображением, отображаемым в режиме моноэкрана, характеристики по разрешению и частоте кадров (рис. 3.9.11).

Основные системные характеристики ЦКК и РТИ были продемонстрированы во время проведения на космодроме «Восточный» автономных и комплексных испытаний ЦКК и РТИ:

- комплекс поддерживает получение, обработку и распределение ТИ от не менее 40 источников ТВ-сигналов (из них 16 *HD*-качества);
- комплекс обеспечивает распределение ТВ-информации не менее 20 различным потребителям (с возможностью увеличения до 40 и более);

- скорость передачи данных по внутренней волоконно-оптической сети передачи данных ЦКК и РТИ – 1Гбит/с (с возможностью увеличения до 10 Гбит/с);
- количество источников ТВ-информации, поддерживаемое одним комплектом Аппаратуры сопряжения с источниками ТВ-информации – не менее 10 источников *HD*-качества;
- количество независимых каналов подготовки и передачи ТВ-информации внешним потребителям – не менее 6.

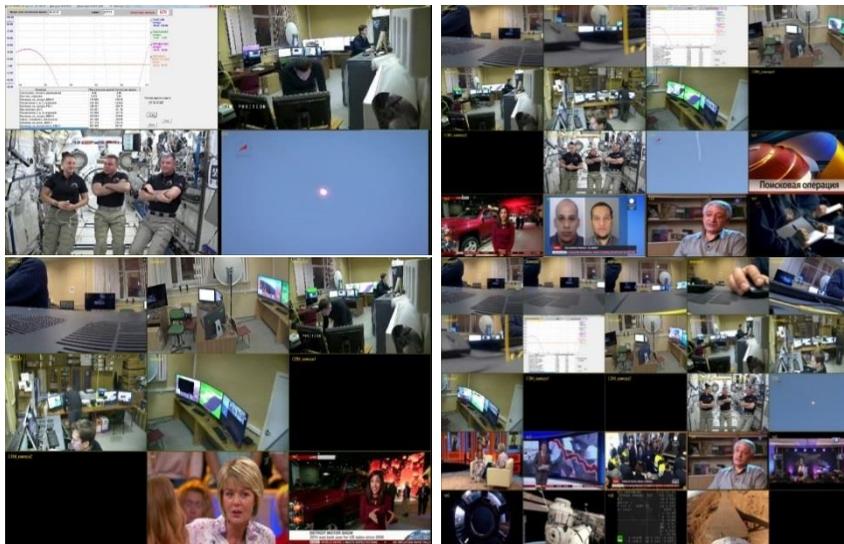


Рис. 3.9.11. Скриншоты экранов АОТИ в различных режимах мультиэкрана: 2×2; 3×3; 4×4; 5×5

Система приёма и трансляции видеoinформации с площадок космодрома – далее система видеомониторинга (СВМ) [228] была разработана, развернута и запущена в опытную эксплуатацию АО «НИИТ» в 2013г. для обеспечения оперативного удалённого контроля хода строительных работ на площадках космодрома «Восточный». Действующая СВМ позволяет:

- осуществлять передачу видеoinформации по каналам с небольшой пропускной способностью (не более 512 кбит/с на канал);
- обеспечивать потоковую трансляцию видеoinформации большому количеству пользователей на космодроме и в Москве;
- реализовать многоуровневую регистрацию видеoinформации (на самих объектах, в центре управления системой на космодроме и в главном центре управления в Москве) с возможностью поиска и

просмотра любого записанного фрагмента на рабочих местах всех потребителей видеoinформации СВМ;

- поддерживать удалённое управление видеокамерами (*PTZ*) в соответствии с правами, наделёнными центром управления системой;

- многократно увеличивать число подключаемых камер и контролируемых площадок (при наличии каналов передачи данных на новых площадках) без изменения архитектуры системы и доработки программного обеспечения;

- отображать видеoinформацию на экране монитора пользователей в режиме мультиэкрана с возможностью перехода к просмотру изображения только от одной выбранной камеры.

СВМ строилась и работает в сложных условиях:

- широкий диапазон рабочих температур для наружного оборудования (температура окружающей среды от -45°C до $+45^{\circ}\text{C}$), большое количество осадков, сильные грозы;

- длительное время на строительных площадках не было промышленного электропитания – СВМ получали электропитание от дизель-генераторов, используемых строителями;

- отсутствовали сооружений, на которых можно было бы установить видеокамеры;

- на строительных площадках отсутствовали помещения, приспособленные для размещения серверного и сетевого оборудования;

- отсутствовала телекоммуникационная инфраструктура, способная передавать широкополосную видеoinформацию;

- на первых порах система функционировала автономно, без участия подготовленного персонала.

К моменту первого пуска с космодрома «Восточный» СВМ обеспечивала передачу видеoinформации от 15 видеокамер (11 внешних и 4 внутренние), размещённых на четырех объектах космодрома.

Сеть передачи данных для СВМ была построена совместно с операторами сотовой связи МегаФон и Билайн на основе беспроводных технологий. При этом сбор видеoinформации от видеокамер, размещённых на строительных площадках, осуществлялся с помощью оборудования *WiMax* (по топологии «звезда») и *Wi-Fi* (по топологии «точка-точка»). А для передачи информации с базовых станций в Региональный центр управления СВМ, оборудованный во временном узле связи космодрома, использо-

вались радиорелейные каналы (топология «точка-точка»). Региональный центр управления СВС связан с главным центром управления СВМ (г. Москва, ФГУП «ЦЭНКИ») с помощью волоконно-оптического канала связи.

Схема организации СВМ приведена на рис. 3.9.12, где АПОТВИ – аппаратура приёма, обработки и трансляции видеoinформации; АФТВИ – аппаратура формирования и трансляции видеoinформации; АК – абонентский комплект приёмо-передающей аппаратуры сети *WiMax*; БС – базовая станция сети *WiMax*; ВК – видеокамера; РРЛ – радиорелейная линия; СВ – строительный вагончик; СП – строительная площадка.

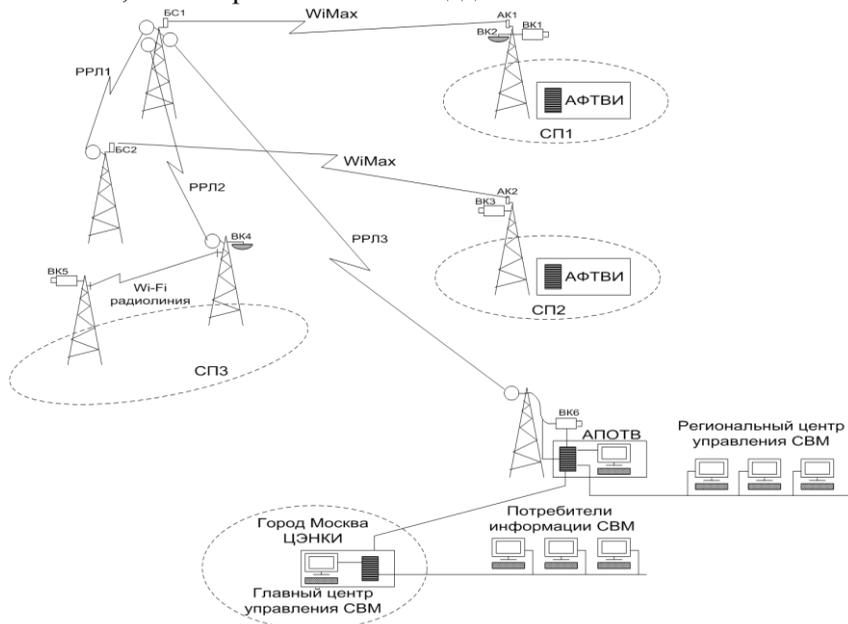


Рис. 3.9.12. Схема организации системы видеомониторинга

Главными элементами СВМ являются АПОТВИ и АФТВИ. АПОТВИ установлена на всех СП космодрома, на которых размещены видеокамеры СВМ. АПОТВИ обеспечивает приём видеoinформации от видеокамер, питание видеокамер (используется технология *PoE*), резервную запись видеoinформации, грозозащиту видеокамер и всего оборудования по цепям питания и информационным цепям, местное и удаленной управление параметрами и режимами работы видеокамер, обеспечение всего инфокоммуникационного оборудования, размещенного на строи-

тельной площадке, бесперебойным и стабильным электроснабжением, маршрутизацию, коммутацию и передачу видеoinформации на региональный и главный центры управления СВМ. При этом формирование, сбор и передача видеoinформации осуществляется с помощью IP-технологий.

Структурная схема АПОТВИ приведена на рис. 3.9.13, где ВК – видеокамера; КВК – купольная видеокамера; БГИ – блок грозозащиты по информационным цепям; БГЗП – блок грозозащиты по цепям питания; КС – коммутатор сетевой; ВС – видеосервер; М – монитор; Кл – беспроводная клавиатура; ИБП – источник бесперебойного питания.

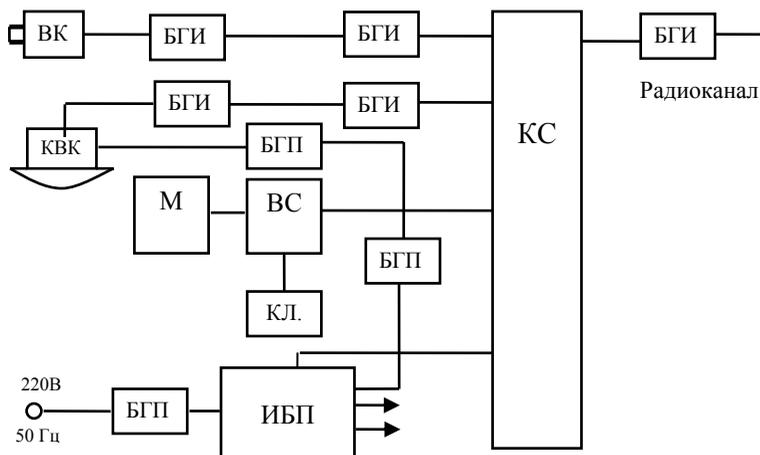


Рис. 3.9.13. Структурная схема АПОТВИ

Внешний вид стойки, в которой размещена АПОТВИ, и скриншот с экрана монитора СВМ, сделанный зимой 2016 г., приведены на рис. 3.9.14. и 3.9.15 соответственно.



Рис. 3.9.14. Внешний вид стойки АПОТВИ

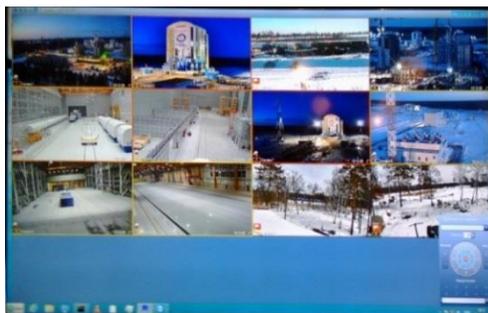


Рис. 3.9.15. Скриншот с экрана монитора СВМ

Варианты размещения видеокамер и телекоммуникационного оборудования показаны на рис. 3.9.16.

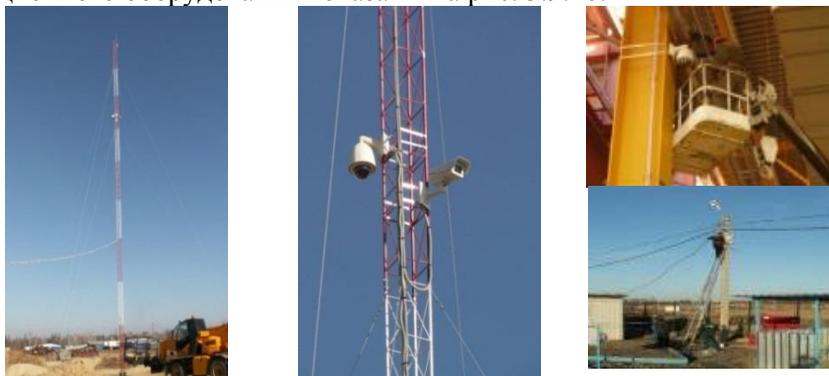


Рис. 3.9.16. Варианты размещения видеокамер СВМ

Структурная схема АФТТВИ практически совпадает со структурной схемой, изображенной на рис. 3.9.13; главное отличие АПОТВИ и АФТТВИ состоит в используемом специальном программном обеспечении.

Трёхлетний опыт применения СВМ показал, что система в целом полностью соответствует требованиям, предъявляемым к ней по качеству формируемого изображения и надёжности функционирования в очень непростых условиях ведущейся стройки: в процессе эксплуатации системы в связи с повышенной грозоактивностью в районе космодрома пришлось только усилить грозозащиту всех элементов СВМ, размещённых на открытых строительных площадках.

Особенности использования ЦКК и РТИ при обеспечении первого пуска

Источниками ТВ-информации на космодроме «Восточный» при обеспечении первого пуска являлись [230]:

- система технологического телевидения стартового комплекса;
- система обработки данных бортовой системы видеоконтроля (БСВК);
- передвижная телевизионная станция (ПТС);
- тестовые видеокамеры из состава АСИТИ на основных объектах пускового минимума;
- система обработки телеметрических данных;
- система видеомониторинга;
- система технологического телевидения технического комплекса.

Основными получателями ТИ являлись:

- аппарата отображения телевизионной информации (АОТИ), входящая в состав ЦКК и РТИ;
- аппарата отображения ТИ системы технологического телевидения стартового комплекса;
- система информационного обеспечения восточного командно-измерительного пункта (СИО ВКИП);
- система информационного обеспечения руководителя запуска (СИО РЗ);
- аппарата отображения ТИ в зале заседания Госкомиссии;
- аппарата отображения ТИ в зале руководства ЦЭНКИ;
- аппарата отображения ТИ на наблюдательных пунктах;
- аппарата приёма, распределения и отображения ТИ в Москве (Щепкина, 42).

Структурная схема взаимодействия основных источников и потребителей телевизионной информации на космодроме «Восточный» при обеспечении первого пуска приведена на рис. 3.9.17.

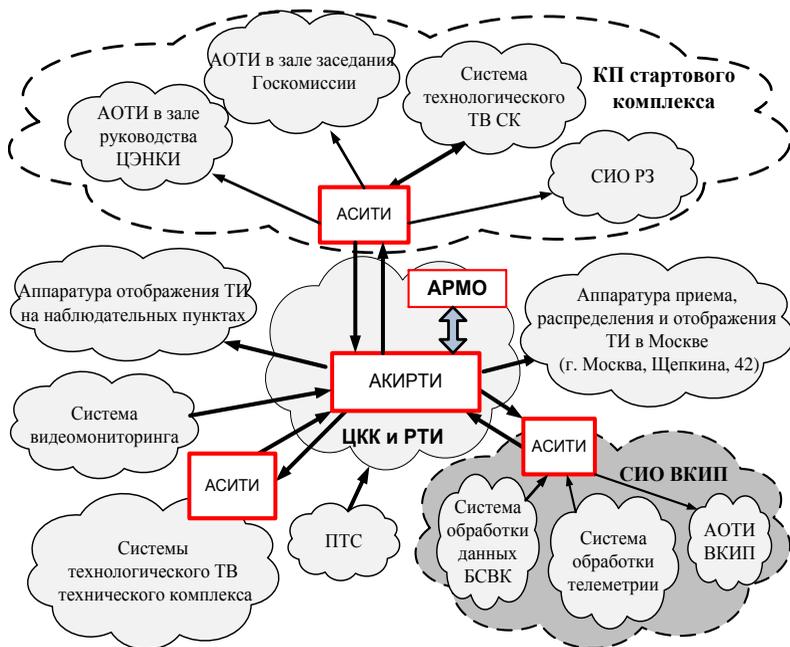


Рис. 3.9.17. Структурная схема взаимодействия основных объектов космодрома «Восточный» при обмене телевизионной информацией во время первого пуска

Распределение ТИ с помощью ЦКК и РТИ при обеспечении первого пуска осуществлялось с учётом ограниченного ресурса имеющихся каналов связи между основными объектами космодрома (табл. 3.9.1).

Важнейшую и довольно непростую функцию сопряжения ЦКК и РТИ с большим количеством разнородных информационных сетей источников и пользователей ТИ, использующих различное специальное программное обеспечение, с успехом выполнили опытные образцы аппаратуры сопряжения с источниками телевизионной информации (АСИТИ), входящие в состав ЦКК и РТИ и размещённые на всех объектах космодрома, задействованных при подготовке и выполнения первого пуска.

Таблица 3.9.1

Источники видеoinформации			
<i>Наименование системы</i>	Виды телевизионной информации		
Система технологического телевидения СК	Видео с камеры 1 (вид на систему поджига)	Видео с камеры 2 (вид на ракету с южной стороны)	Видео с камеры 3 (вид на ракету с северной стороны)
Система обработки данных БСВК	Видео с внешней камеры БСВК	Видео с внутренней камеры БСВК	
ПТС	Видео ракеты на стартовом столе и в полёте		
Тестовые видеокамеры АСИТИ	Использовались только на этапе настройки трактов ЦКК и РТИ		
Система обработки телеметрии	Графический телеметрический формуляр		
Система видеомониторинга	Видео от 12 камер		
Получатели видеoinформации			
<i>Наименование системы</i>	<i>Виды телевизионной информации</i>		
Аппаратура отображения информации в зале заседания Госкомиссии	От ПТС (видео ракеты на стартовом столе и в полете)	Видео с внешней камеры БСВК	Графический телеметрический формуляр
Аппаратура отображения информации на наблюдательных пунктах	От ПТС (видео ракеты на стартовом столе и в полете)	Видео с камер системы технологического ТВ СК	Графический телеметрический формуляр

<i>Продолжение таблицы 3.9.1</i>			
Аппаратура отображения информации в зале руководства ФГУП «ЦЭНКИ»	От ПТС (видео ракеты на стартовом столе и в полете)	Видео с камер системы технологического ТВ СК	Графический телеметрический формуляр
Аппаратура приёма, распределения и отображения ТИ в Москве (Щепкина, 42)	От ПТС (видео ракеты на стартовом столе и в полете)	Видео с камеры 1 системы технологического ТВ СК (вид на систему поджига)	Графический телеметрический формуляр
Аппаратура отображения ТИ ВКИП	От ПТС (видео ракеты на стартовом столе и в полете)	Видео с камеры 1 системы технологического ТВ СК (вид на систему поджига)	
Система технологического телевидения стартового комплекса	От ПТС (видео ракеты на стартовом столе и в полете)	Видео с внешней камеры БСВК	Видео с внутренней камеры БСВК
Система обработки данных БСВК	От ПТС, видео ракеты на стартовом столе и в полете		
Табло отображения АРМО	От ПТС (видео ракеты на стартовом столе и в полете)	Видео с внешней камеры БСВК	Графический телеметрический формуляр от системы обработки телеметрии
	Видео с внутренней камеры БСВК	От СВМ, мультэкран с изображением от 12 камер	Видео с камеры 1 (вид на систему поджига)
	Видео с камеры 2 (вид на ракету с южной стороны)	Видео с камеры 3 (вид на ракету с северной стороны)	

Управление распределением телевизионной информации в процессе подготовки и выполнения первого пуска осуществлялось с пульта АРМО (рис. 3.9.18).

Схема организации обмена ТИ между объектами телевизионной инфраструктуры космодрома «Восточный» при обеспечении первого пуска приведена на рис. 3.9.19.

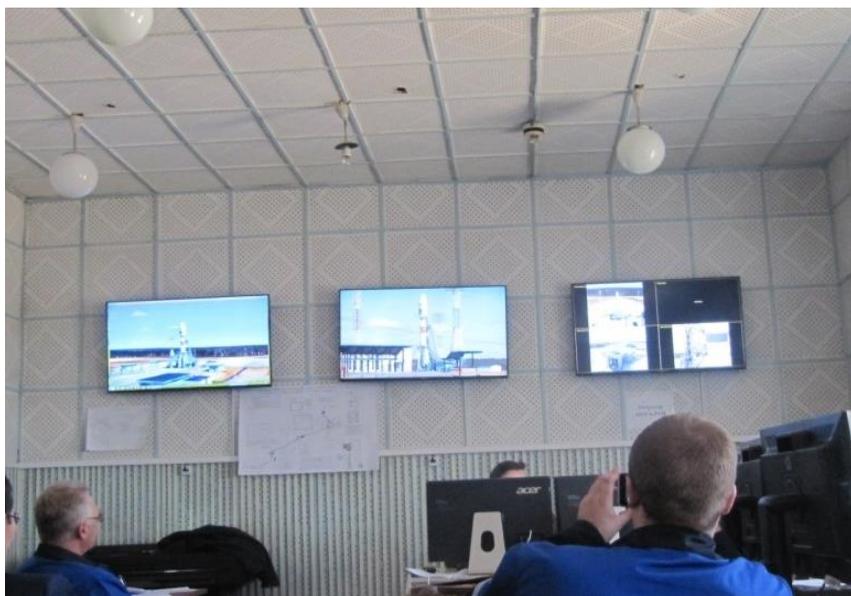


Рис. 3.9.18. Аппаратная АРМО ЦКК и РТИ
28 апреля 2016 г. за 3 минуты до пуска

На рис. 3.9.19. приняты следующие обозначения: НП – наблюдательный пункт, А – АОТИ; К – коммутатор аппаратно-программного комплекса мультисервисной сети передачи информации космодрома; Р – терминал радиорелейной связи; С – терминал спутниковой связи; ВКИП – восточный командно-измерительный пункт; СИО ВКИП – система информационного обеспечения ВКИП; В – видеостена; С – серверное оборудование; КП СК – командный пункт стартового комплекса; АОТИ ГК – аппаратура отображения ТИ в зале Госкомиссии; АОТИ ЗР ЦЭНКИ – аппаратура отображения ТИ в зале руководства ФГУП «ЦЭНКИ»; М – маршрутизатор; ССТВ СК – система технологического телевидения стартового комплекса; ПТС – передвижная телевизионная станция; АКирТИ – аппаратура коммутации и распределения ТИ; АРМ – автоматизированное рабочее место.

На рис. 3.9.20 – 3.9.27 представлены фотографии, иллюстрирующие отображение ТИ на наиболее важных объектах космодрома «Восточный» в процессе подготовки и выполнения первого пуска.

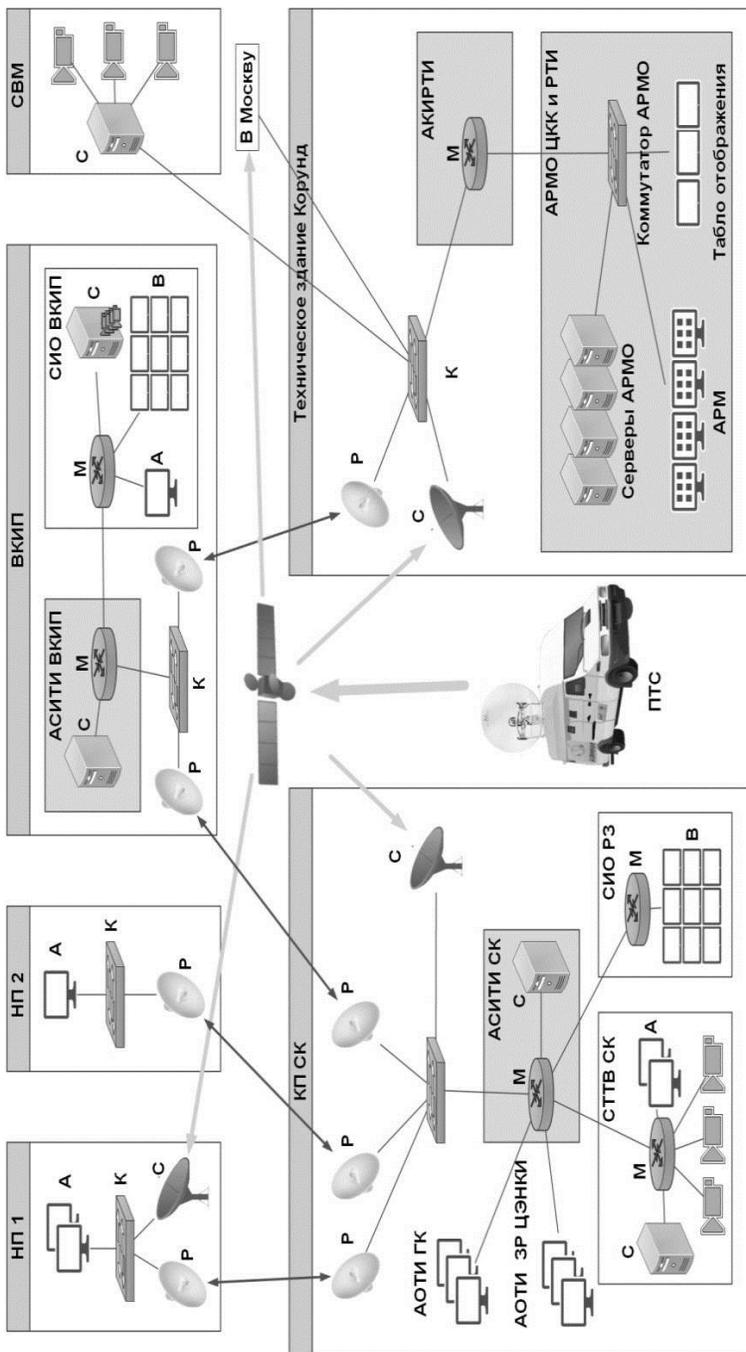


Рис. 3.9.19. Схема организации обмена ТИ между объектами телевизионной инфраструктуры космодрома «Восточный» при обеспечении первого пуска



Рис. 3.9.20. Отображение телеинформации от ПТС на видеостене СИО РЗ



Рис. 3.9.21. Отображение видеопотока от ПТС средствами СТТВ СК (видеопоток ПТС – в верхнем левом углу)

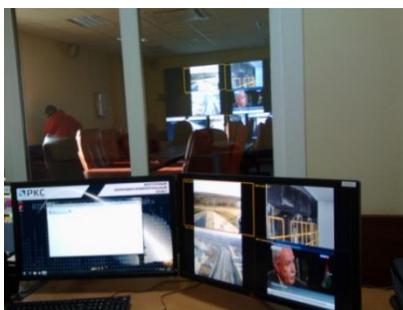


Рис. 3.9.22. Вывод изображений от ЦКК и РТИ



Рис. 3.9.23. Отображение ТИ на мониторах АОТИ в кабинете НП 1



Рис. 3.9.24. Настройка АОТИ в зале Госкомиссии



Рис. 3.9.25. Изображение, передаваемое ЦКК и РТИ внешним потребителям при максимальной скорости передачи 2 Мбит/с



Рис. 3.9.26. Вывод изображения БСВК на АОТИ командного пункта СК

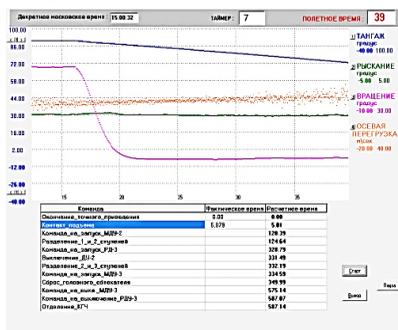


Рис. 3.9.27. Скриншот изображения телеметрического формуляра, получаемого от ВКИП

В процессе подготовки и выполнения первого пуска разработанный комплекс ЦКК и РТИ продемонстрировал устойчивую и безотказную работу, обеспечил качественную доставку и отображение ТИ на АОТИ всех потребителей ТИ на космодроме «Восточный». Эксплуатация комплекса ЦКК и РТИ в процессе подготовки и выполнения первого пуска выполнялась объединенным расчетом в составе специалистов ФГУП «ЦЭНКИ» и АО «НИИ телевидения».

Глава 4. ПЕРСПЕКТИВЫ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Известно, что прогнозирование – тяжёлая работа, ошибок случается огромное количество. Ведь даже А. Беляев, предсказав телевизионную связь Земля–КА, не догадался хотя бы об обратной связи, не говоря об исследованиях космоса и Земли из космоса. Причин ограниченных возможностей прогностики несколько. Наиболее часто в качестве причины упоминают ускорение технического прогресса, в силу чего *горизонт предсказуемости* в науке и технике постоянно к нам приближается. Вместе с тем главной причиной ошибочных прогнозов является *закон конечного качества информации (минимального информационного риска)*. В приложении к синтаксической информации этот закон подробно рассмотрен в [36] и разделе 2.1. В теории семантической информации существует аналогичная концепция [231], утверждающая, что *«наше наилучшее знание содержит как истину, так и заблуждения»*, и что необоснованный переход от *предсказания* к *пророчеству* является заблуждением «из-за неустранимой особенности человеческой природы, состоящей в том, что *мы никогда не знаем, что ещё нам предстоит открыть»*; вместе с тем *«мы всегда будем ломать голову над тем, как планировать непознаваемое будущее»*.

Конечно, в области космической техники можно руководствоваться часто цитируемой идеей экспансии, высказанной К. Э. Циолковским: «человечество не останется вечно на Земле, а сначала робко проникнет за пределы Земной атмосферы, а затем завоюет всё околосолнечное пространство». Эта идея экспансии, конечно в более скромном виде, присутствует и в прогнозе развития космонавтики в XXI веке [3].

Прогнозированию развития космического телевидения эта идея не помогает, так как его проблематика почти не зависит от перехода исследований Луны к исследованиям, например, спутников Юпитера. Поэтому требуются идеи иного плана, основанные не столько на кинематике космических аппаратов и приборов, сколько на *информации*, и в первую очередь, на качестве видеoinформации, получаемой этими приборами как для собственного функционирования, так и для понимания человеком космоса.

Сокращение горизонта предсказуемости привело даже к тому, что астронавт Н. Армстронг сетовал: *«Наука ещё не научилась предвидению. Мы предсказываем слишком много на грядущий год и слишком мало на ближайшие десять»* [232]. Вместе с тем в нашей стране имеются не только конкретные цели космонавтики на ближайшее десятилетие, изложенные Федеральной космической программе России на 2016–2025 гг. [233], но и прогноз её развития до 2035 г. и даже до конца XXI века [3]. Опираясь на эти цели и прогнозы, мы делаем скромную попытку заглянуть в будущее космического телевидения (в рамках *достаточно близкого горизонта предсказуемости*), выделяя два направления: первый, относящийся непосредственно к технологиям телевидения, и второй, связанный с перспективными общенаучными и оборонными задачами, решению которых должна помочь телевизионная техника.

4.1. Тенденции развития отечественной космонавтики

Федеральная космическая программа России на 2016–2025 годы нацелена, в частности, на создание космических аппаратов нового поколения с характеристиками, соответствующими или превышающими характеристики лучших мировых аналогов, опережающее создание отдельных ключевых технологий, элементов и целевых приборов для наиболее приоритетных космических комплексов, разработка которых ожидается после 2025 г. Реализация Программы позволит придать импульс для развития имеющегося космического потенциала, обеспечит решение стратегических задач совершенствования и развития ракетно-космической техники в интересах обороноспособности, безопасности, социально-экономического развития страны, науки и международного сотрудничества, обеспечения гарантированного доступа и необходимого присутствия России в космическом пространстве.

Не останавливаясь на общетехнических, чисто связных и навигационных задачах, поставленных программой, отметим лишь задачи, имеющие отношение к космическому телевидению [233]:

- развёртывание до необходимого состава и обеспечение непрерывного и устойчивого управления российскими объектами на траекториях полёта к Луне и Марсу и орбитальными группировками автоматических и пилотируемых космических аппаратов на околоземных орбитах (в том числе увеличение КА ДЗЗ с 8 в 2015 г. до 23 в 2025 г.); в рамках программы «Цифровая Земля» начато создание и регулярное обновление сплошного бесшовного покрытия данными

ДЗЗ территории всего земного шара; точность модели Земли составит около 1 м с периодической актуализацией; для реализации проекта создана Единая территориально-распределённая информационная система (ЕТРИС ДЗЗ) [265];

- создание не менее 5 космических аппаратов для проведения углубленных исследований Луны с окололунной орбиты и на её поверхности автоматическими космическими аппаратами, а также для доставки образцов лунного грунта на Землю;
- предоставление данных дистанционного зондирования Земли из космоса, получаемых с космических аппаратов гидрометеорологического, океанографического и гелиогеофизического назначения, отвечающих потребностям гидрометеорологической службы, в том числе для активного освоения арктических районов РФ (рис. 4.1.1);
- выполнение международных обязательств по участию не менее чем в 2 миссиях в рамках международной кооперации по исследованию Марса, Венеры, Меркурия и Солнца, в осуществлении полётов автоматических космических аппаратов к планетам и телам земной группы, доставке грунта с Фобоса;

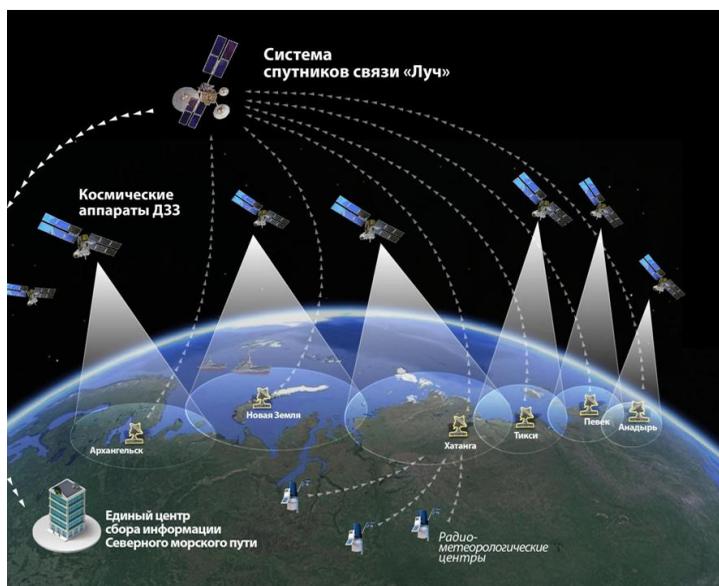


Рис. 4.1.1. Перспективы создания многофункциональной системы мониторинга метеорологических условий на протяжении Северного морского пути на основе комплекса «Сюжет-МФ» (см. раздел 3.7)

- создание на космодроме «Восточный» космического ракетного комплекса тяжёлого класса для выведения автоматических космических аппаратов, а также развёртывание работ, связанных с ракетой-носителем тяжелого класса для выведения тяжелых автоматических космических аппаратов, пилотируемых кораблей и орбитальных модулей на траектории полёта к Луне, облёта Луны и лунных орбит;

- проведение научно-исследовательских работ, создание перспективных базовых изделий и освоение критических технологий, обеспечивающих создание изделий ракетно-космической техники с характеристиками, соответствующими или превышающими характеристики лучших мировых аналогов, созданных по перспективным производственным технологиям, с использованием систем цифрового проектирования и моделирования, аддитивных технологий и новых композиционных материалов, элементной базы нового поколения, а также перспективных коммуникационных систем, приборов и устройств на основе технологий фотоники и квантовых эффектов;

- создание не менее двух отечественных космических обсерваторий и разработка до уровня наземной экспериментальной отработки комплекса научной аппаратуры для проведения исследований астрофизических объектов;

- завершение развёртывания российского сегмента Международной космической станции в составе 7 модулей и продолжение её эксплуатации до 2024 г. с обеспечением технической возможности создания российской орбитальной станции на базе 3 российских модулей Международной космической станции после завершения её эксплуатации;

- создание космического комплекса и выполнение программы по исследованию факторов, воздействующих на живые организмы в ходе полётов космических аппаратов на околоземных орбитах.

Основные планируемые мероприятия: международный проект по исследованию Марса «ЭкзоМарс», реализация научных программ исследований астрофизических объектов (КА «Спектр-РГ», «Спектр-УФ») и реализация первого этапа лунной программы, предусматривающего запуск 5 автоматических КА («Луна-Глоб», «Луна-Ресурс» (орбитальный аппарат, посадочные аппараты (включая резервный) «Луна-Грунт»)).

До 2025 г планируется осуществить запуски следующих КА:

- для реализации научных программ исследований астрофизических объектов – 2 КА («Спектр-РГ», «Спектр-УФ»);
- для изучения комбинированных эффектов невесомости и ионизирующей радиации на различные организмы в ходе полёта – 2 КА («Бион» № 2, 3);
- для исследования Луны, Марса и планет Солнечной системы – 8 КА («Луна-Глоб», «Луна-Ресурс» (орбитальный аппарат, посадочные аппараты (включая резервный), «ЭкзоМарс» № 1, 2, «Луна-Грунт», «Экспедиция-М»);
- для глобального стереообзора Солнца, контроля солнечной активности и космической погоды – 3 КА («Арка», «Резонанс», «Ломоносов»).

В плане пилотируемых полётов планируется эксплуатация МКС до 2024 г., российский сегмент МКС будет оснащён модулями, которые уже находятся в производстве, дополнив их системами, обеспечивающими автономность полёта после 2024 г., для обеспечения возможности создания на их основе российской орбитальной станции. Эксплуатация МКС до 2024 г. обеспечит проведение экспериментов в интересах социально-экономической сферы и отработку ряда перспективных технологий и космических систем (комплексов), необходимых для реализации программ освоения Луны и дальнего космоса.

Для обеспечения доставки людей и грузов к Луне и на станции, находящиеся на околоземной орбите, РКК «Энергия» им. С. П. Королёва уже приступила к изготовлению нового российского многоразового КА «Федерация» [234]. Для создания аппарата применяются новейшие технологии, некоторые из которых не имеют аналогов в мировой космонавтике. Первый корабль будет ориентирован на низкую орбиту и на 80 % изготовлен из композитных материалов, а спускаемый аппарат – из алюминия [234].

Лётные испытания «Федерации» в беспилотном варианте должны начаться в 2021 г. Пилотируемый полёт со стыковкой к МКС состоится не ранее 2023-го. Ожидается, что в режиме автономного полёта корабль сможет находиться до 30 суток, при полёте в составе орбитальной станции – до 1 года. Ранее сообщалось, что аппарат проектируется в двух вариантах вместимости – четырёхместном и шестиместном.

В рамках реализации второго этапа лунной программы (пилотируемого) планируется в 2021 г. начать в беспилотном

варианте лётные испытания пилотируемого космического корабля нового поколения, а в 2023 г. – провести первый пуск с экипажем к МКС. Программа предусматривает создание задела для полномасштабного исследования Луны после 2025 г. и осуществление к 2030 г. высадки человека на Луну.

Особое значение для обеспечения перспективы развития отечественной космической техники и ракетно-космической отрасли имеет развитие базовых элементов и *перспективных технологий*. Будет обеспечено требуемое качество и безопасность ракетно-космической техники, включая развитие методов и средств наземной отработки космических автоматических и пилотируемых аппаратов, создание *отечественной компонентной базы* космического применения, развитие системы контроля околоземного космического пространства и предупреждения об опасных сближениях.

Прогнозы на длительные периоды времени хотя и более трудны, но коллектив авторов под руководством академика Б. Е. Чертока [3] взял на себя труд и смелость дать прогноз на весь XXI век. Большинство тезисов этого прогноза представляются достаточно обоснованными. Например:

«С начала космической эры на геостационарную орбиту выведено более 800 космических аппаратов, принадлежащих различным государствам или международным корпорациям связи. Теснота на геостационарной орбите приведёт к борьбе за стратегически выгодные точки размещения будущих мощных многоцелевых станций. Перефразируя высказывание одного из американских сенаторов, я бы сказал – "кто будет хозяином на геостационарной орбите и на Луне, тот будет править и на Земле"...

Российские стыковочные агрегаты до сих пор не имеют конкурентов. Эта российская техника будет в полной мере использована в различных программах XXI века...

Темпы развития современных глобальных информационных и навигационных технологий, использующих космические системы, позволяют утверждать, что в ближайшие 10...15 лет видеосвязь по принципу "каждый с каждым" во всем мире будет так же доступна, как современные карманные мобильные телефоны...

Всеволновый оптический и радиомониторинг земли, океанов и воздушного пространства, объединённые...

Россия должна уделять основное внимание программам безусловной космической безопасности (спутники всех видов связи, ДЗЗ, включая разведку, ПРО, ГЛОНАСС и метео).

4.2. Тенденции развития космического телевидения

Как и сейчас, в будущем космическое телевидение будет ответственно и за сбор информации, и за её распространение. Землепользовательские и оборонные оптико-электронные системы, имеющие сейчас разрешение на местности немногим лучше 1 м/пиксел, благодаря применению оптики с большой апертурой позволят увеличить разрешение более чем в 10 раз. При этом будут созданы гиперспектральные системы с потенциально большим количеством спектральных каналов, доходящим до тысячи, охватывающие практически весь диапазон электромагнитного излучения, для которого атмосфера Земли прозрачна, в первую очередь – от ультрафиолетового до инфракрасного диапазона (от 0,2 мкм до 14 мкм) [67]–[69].

Эти две тенденции развития вызовут необходимость резкого увеличения не только *пропускной способности* каналов связи [208], но и *производительности* бортовых компьютеров [13], которые будут обеспечивать предварительную обработку изображений и передачу на Землю лишь целевой (доминантной) компоненты полученной видеoinформации, исключая фоновую и шумовую информации.

Борьба за повышение *качества видеoinформации*, передаваемой из космоса на Землю или используемой космическими автоматическими (роботизированными) системами, будет опираться на всё более полный учёт априорной информации о наблюдаемых сюжетах (особенностей фоно-целевой обстановки) и расширение функций и «зон ответственности» бортовых компьютеров (специализированных вычислителей) для обнаружения объектов и оценки их параметров. При этом широко будут использоваться методы параллельной обработки видеoinформации [235] и *нейросетевые* методы обработки видеoinформации [89], [236]. Теоретические исследования должны включить в арсенал методов проектирования космических видеoinформационных систем *формализованный статистический синтез* с использованием вектора концепции системы с существенно бóльшим числом показателей качества, чем в [36], [92]. В число таких показателей (компонент вектора концепции системы) кроме главных – точности, скорости и задержки передачи и сложности кодеров (обнаружителей объектов), а также традиционных стойкости к факторам космического пространства, массо-габаритным показателям и энергопотреблению – должны войти время обучения нейрокомпьютера, его адаптивность к изменениям статистик наблюдаемых сюжетов,

например, по ходу движения КА по эллиптическим орбитам с большим эксцентриситетом.

Такой широкий охват параметров потребует не только отработанных методов вероятностной теории информации и развития структурных методов сокращения вычислительной сложности бортовых процессоров (без ущерба остальным показателям качества видеоинформации), но и использования алгоритмической теории информации и теории сложности вычислений.

Космическое телевидение вещательного направления, перейдя к форматам высокой и сверхвысокой чёткости, будет не только цифровым, но и станет объёмным. При этом будут развиваться и методы кодирования сигналов цифрового телевидения: методы доминирующего сейчас стандарта *MPEG* в задачах кодирования многомерных телевизионных сигналов уступят место более универсальным и скоростным алгоритмам.

Наряду с прагматическими аспектами использования космического телевидения на орбитальных комплексах и при исследовании Земли отчасти будет проявляться и спортивно-романтическая черта характера человеческой цивилизации. Значимость таких проектов для цивилизации в целом велика, член Совета по Космосу РАН академик РАН Э. М. Галимов подчёркивал [237]: *«Нужно понять, что сегодня исследование Солнечной системы, изучение внеземного вещества, химического строения Луны и планет, поиск внеземных форм жизни, понимание физики Вселенной – это передовая линия фундаментальной науки. Современные космические исследования следует рассматривать не как одно из направлений или один из разделов науки, а как этап развития науки»*.

Усиливаться будут не только вещательные и землепользовательские сегменты космического телевидения, но и оборонные. Не случайно США и НАТО предусматривают активные меры по недопущению использования противником его средств дистанционного зондирования земной поверхности из космоса, спутников связи, телекоммуникации, разведки, навигационного обеспечения, метеоразведки – систем критически значимых для организации эффективного противодействия. В отличие от метеорологических и землепользовательских систем космического телевидения, строящихся исключительно с использованием линейных фотоприёмников и развёртки изображения за счёт полёта спутника по орбите, оборонные системы космического телевидения, как и системы внеатмосферной астрономии, будут строиться и с использованием матричных фотоприёмников [38].

Для реализации перспектив космического телевидения предстоит решить ряд проблем, среди которых:

- создание отечественной микроэлектронной базы, пока существенно отставшей от мирового уровня. Космическое телевидение нуждается в широкой номенклатуре отечественных КМОП СБИС, построенных как системы на кристалле и *видеосистемы на кристалле* [35], [36], [262];

- создание гиперспектральных систем с потенциально большим количеством спектральных каналов, число которых определяется интенсивностью отражённого Землёй солнечного излучения, производительностью бортовых компьютеров селекции наиболее информативных каналов и пропускной способностью каналов связи бортовых систем с наземными пунктами.

Наращивание качества видеоинформации, связанного с характеристиками твердотельных фотоприёмников (количеством мегапикселей, кадровой частотой, контрастной чувствительностью, охватом широкого спектрального диапазона и т. п.) возможно лишь на основе субмикронной технологии, освоенной отечественной промышленностью лишь в малой степени. С целью исключения снижения промышленного, оборонного и научного потенциала страны и с целью *импортнезависимости* в России разрабатывается методология постепенной замены импортных электронных компонентов на отечественные [6], [24]. При решении этой стратегической задачи оборонно-промышленный комплекс опирается на Перечень *критических* технологий Российской Федерации (утверждён Указом Президента Российской Федерации 7 июля 2011 г. № 899). К обсуждаемой проблематике космического телевидения относятся следующие направления:

- базовые и критические военные и промышленные технологии для создания перспективных видов вооружения, военной и специальной техники (п. 1 Перечня);

- технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации её загрязнения (п. 19 Перечня);

- технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (п. 21 Перечня);

- технологии создания электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств (п. 25 Перечня).

Конкретизация направлений развития технологий, имеющих отношение к космическим телевизионным системам, даётся

в Федеральных целевых программах (ФЦП), в т. ч. «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники». В них, в частности, предусмотрена разработка матриц ИК диапазона (криогенно охлаждаемых и неохлаждаемых). Аналогичный акцент на необходимость создания современных отечественных ИК фотоприёмников сделан и в работах [25]–[27]. В области ИК матичных фотоприёмников имеется существенное отставание отечественной промышленности, также не решен ряд крупных технологических задач, которые должны быть отражены в следующих этапах ФЦП. Учитывая важность для оборонных и научных космических видеоинформационных систем создания крупноформатных матричных сборок фотоприёмников на основе технологий ПЗС и КМОП как видимого диапазона [70], так и ИК диапазона [27], целесообразно обеспечить их разработку в РФ в рамках ФЦП «Развитие оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации» и «Развитие фотоники». При этом важно, что разработка ЭКБ должна опережать создание соответствующих космических систем, то есть финальной продукции.

В обеспечение космических видеоинформационных систем, в первую очередь, видимого диапазона, в ведущих в области фотоприёмников предприятиях, входящих в АО «Российская электроника», разрабатывались и разрабатываются линейные и матричные приборы с зарядовой связью. Эти приборы активно совершенствовались в направлении увеличения количества элементов, повышения эффективности переноса зарядов и увеличения радиационной стойкости [24], [30]–[32]. В ФЦП «Развитие ОПК» есть подпрограмма «Развитие ЭКБ и радиоэлектроники» и специальный раздел «Радиационнотойкая ЭКБ» (в рамках которого создаются некоторые образцы СБИС для космических видеоинформационных систем, см. разделы 3.2, 3.3), но пока нет раздела «Матричные фотоприёмники видимого и инфракрасного диапазонов и видеосистемы на кристалле».

Вместе с тем, обеспечение оборонной космической техники отечественной видеоинформационной ЭКБ пока явно *не достаточно* [5]–[7], [38]. Исправление этой ситуации не только востребовано требуемыми характеристиками систем, но и обеспечено, во-первых, потенциальными возможностями микроэлектроники, обусловленными вторым этапом твердотельной революции в телевидении, связанным с КМОП структурами и субмикронными технологиями, породившими, в частности, такое уникальное явление микроэлектроники, как видеосистемы на кристалле [36],

[37]; во-вторых – уже созданной при поддержке правительства Российской Федерации на предприятиях страны *сети* базовых центров проектирования («дизайн-центров») системного и топологического уровней.

Анализ состояния и тенденций развития космических телевизионных систем и существующей отечественной и импортной видеоинформационной ЭКБ видимого диапазона [38] показывает, что необходимость концентрации научных сил, финансовых и материально-технических средств для осуществления требуемого прорыва в области элементной базы, перспективных технологий для создания средств связи, обнаружения, наведения, автоматизации [238] не потеряла актуальности. Именно сейчас, в период завершения намеченных ранее этапов Федеральной целевой программы развития ОПК с её подпрограммой развития ЭКБ и самостоятельной программы развития ЭКБ и радиоэлектроники, необходимо выделить в самостоятельное направление развитие широкоформатных высокочувствительных фотоприёмников ИК и видимого диапазонов.

4.3. Основные направления технологического развития космического телевидения

Проведённый выше анализ позволяет выделить множество задач [38], среди которых кратко рассмотрим самые важные направления, которые должны войти в программу развития отечественной фотоники с объединяющим признаком радиационной стойкости для космических применений. В ближайшем будущем космическое телевидение освоит фотоприёмные матрицы большого формата и видеосистемы на кристалле, объединяющие фотоприёмный массив и устройства принятия решений, главными структурами фотоприёмников станут приборы с цифровым пикселем (объединяя аналоговое и цифровое накопление как в матричных фотоприёмниках, так и в приборах с временной задержкой и накоплением [35], [36]).

Общая тенденция **перехода от технологии фотоприёмников на ПЗС к КМОП технологии** связана, в первую очередь, с тем, что выход годных КМОП фотоприёмников значительно выше, чем у технологии ПЗС (в КМОП отсутствует перенос заряда на макрорасстояния, составляющие иногда десятки миллиметров). В силу этого фатальные дефекты, которые в ПЗС фотоприёмниках могут привести к выходу из строя целых областей или всего сенсора, в КМОП фотоприёмниках оказывают действие лишь на один пиксел,

видеосигнал с которого может быть интерполирован по значениям видеосигналов с соседних пикселей. Меньшее количество структурных дефектов определяется и базовым технологическим процессом, используемым для изготовления фотоприёмников. Технологии изготовления ПЗС фотоприёмников достигли своего максимального развития уже более 20 лет назад и используют оборудование с разрешением 0,35 мкм, в то время как КМОП фотоприёмники и, в особенности, видеосистемы на кристалле базируются на процессах уровня 0,18...0,09 мкм, что соответствует гораздо более высоким требованиям к повторяемости элементов и разбросу параметров в абсолютных величинах.

Перспективность КМОП технологии связана также с тем, что их фотоэлектрические характеристики и параметры приближаются к потенциально возможному. Так в современных КМОП сенсорах квантовая эффективность в максимуме уже превышает 95%, собственные шумы считывания составляют менее 3-х электронов, темновые токи крайне малы даже при очень высоких температурах, вплоть до +130°C [239]. Использование специальных режимов накопления и считывания в сочетании с логарифмической свет-сигнальной характеристикой позволяет добиться значений динамического диапазона более +100 дБ. В дальнейшем следует ожидать ещё большего расширения динамического диапазона освещённостей в одном кадре (для увеличения контрастной чувствительности потребуется переход к смешанному аналого-цифровому накоплению в пикселе, см. ниже).

Изменение времени накопления в широких пределах от секунд до десятков наносекунд позволит создать телевизионные камеры, в которых не требуется управление диафрагмой объектива, т. к. требуемый диапазон освещённостей будет обеспечен изменением времени накопления и аналоговым усилением видеосигнала непосредственно в пикселе КМОП фотоприёмника. Диапазон освещённостей от 130000 лк (освещённость, создаваемая Солнцем на орбите Земли) до тысячных долей люкса будет обеспечен исключительно внутренними регулировками КМОП фотоприёмника, что упростит требования к оптической системе. Можно прогнозировать и прогресс в области создания оптических систем: для узкоугольных намечается радикальное сокращение масс зеркальных систем, для весьма широкоугольных линзовых систем намечается «укрощение» дисторсий до долей процента. В дальнейшем эти тенденции будут продолжены.

Быстрodeйствующие крупноформатные матричные КМОП фотоприёмники. Структура КМОП фотоприёмников позволяет достаточно простыми средствами реализовать распараллеливание считывания видеоданных. Это обусловит в обозримом будущем широкое использование в космической технике фотоприёмных матриц с достаточно высокими кадровыми частотами (вплоть до килогерц, что актуально при глобальном наблюдении гроз) и со значительным числом пикселей фотоприёмника (16, 36 и более мегапикселей; 36 Мп – стандарт, применяемый, в частности, при построении геостационарных метеорологических систем; потребности внеатмосферной астрономии соответствуют сотням мегапикселей, вплоть до Гигапиксела – *пока* реализуемых с помощью сборок матриц [27], [70]). Уже есть фотоприёмники формата 250 Мегапикселей [240], и это не предел. Например, для 64-мегапиксельного фотоприёмника формата 8К×8К при наличии 32-х выходов видеоданных, работающих с частотой 200 МГц, достижима кадровая частота 100 Гц при считывании всего массива пикселей. Уже в настоящее время встроенные в КМОП фотоприёмник средства позволяют компенсировать разброс параметров различных видеовыходов. Для этого используются либо калибровка, либо статистическая компенсация [241]. В ближайшем будущем эта проблема будет решена полностью.

Уже выпускаются фотоприёмники размером вплоть до 200×80 мм², хотя и с большим размером пиксела 50 мкм. Для матриц сверхбольшой площади, востребованных, в частности, внеатмосферной астрономией, ограничением размеров матрицы становится размер полупроводниковой пластины, на которой формируется топология фотоприёмника. В настоящее время максимальный диаметр используемых кристаллов кремния и, соответственно, полупроводниковых пластин достигает 450 мм, в будущем это значение будет увеличиваться (см. рис. 4.3.1).

Для космической астрономии большое значение имеет возможность формирования фокальных плоскостей большого размера, достигающих до 400×400 мм² [27], [70], [242], [243]. Для этого фотоприёмники должны иметь возможность стыковки с точностью нескольких пикселей, для чего все выходные контакты таких фотоприёмников выводятся на три или две стороны, что сильно ограничивает возможности разработчиков таких приборов при проектировании. В то же время, существуют технологии, позволяющие организовать фотоприёмники таким образом, что все выводы будут

сформированы на обратной стороне по отношению к светочувствительной секции. В совокупности с технологией обратного освещения это позволяет собирать мозаики из фотоприёмников с минимальными зазорами, достигающими единиц пикселей



Рис. 4.3.1. Кремниевые пластины диаметром 450 мм и 300 мм

Показательным примером является фокальная плоскость космического телескопа *Gaia*, имеющая размер примерно 1000×500 мм² и содержащая 104 матричных ПЗС, работающих в режиме временной задержки и накопления (ВЗН). Примером применения больших фокальных плоскостей в системах внеатмосферной астрономии является проект орбитальной звездной стереоскопической обсерватории [128], [244], [245] (см. раздел 4.4).

Перспективным направлением является **интеграция АЦП непосредственно в пиксел**, т. е. реализация третьего поколения КМОП фотоприёмников – с цифровым пикселом [36], [246]. Проблема чувствительности этих фотоприёмников связана с тем, что площадь фотодиода составляет лишь малую часть площади пиксела. Она решается уже в настоящее время технологиями нанесения микролинз или обратной засветки.

Ключевым моментом использования встроенного в пиксел компаратора является возможность радикального увеличения динамического диапазона. При классическом аналоговом накоплении в пикселе динамический диапазон определяется ёмкостью пиксела и не превышает нескольких сотен. Так как реальные сюжеты имеют существенно больший диапазон изменения освещённостей (как в кадре, так и, особенно, в течение сеанса наблюдения), то в телекамерах используется режим АРВН, сокращающий время накопления при избытке освещённости. В результате большинство фотонов преобразуются не в информацию, а в тепло. И только технология цифрового пиксела большой разрядности позволяет преобразовывать все фотоэлектроны в информацию. Идея группового счёта в матрицах со смешанным аналого-цифровым накоплением конкретизируется с учётом концепции максимизации качества информации [36]: существует оптимальный размер накапливаемой группы фотогенерированных электронов, при типовых

значениях шума считывания превышающий его примерно в пять раз, и практически для всех сюжетов космического телевидения достаточным является 24 разряда (3 байта/пиксел) [36].

Использование смешанного аналого-цифрового накопления даже при достаточно небольшой ёмкости фотодиода (выраженной в числе электронов) позволит многократно поднять контрастную чувствительность КМОП фотоприёмника, вплотную подвоя к пределу, ограниченному фотонной структурой света, и далеко перейдя за предел, обусловленный ёмкостью пиксела.

В пиксел со смешанным аналого-цифровым накоплением (*групповым счётом* фотогенерированных электронов) перспективно ввести усилитель с управляемым коэффициентом усиления [36], позволяющим не только регулировать размер группы фотогенерированных электронов, но и с высокой точностью осуществлять выравнивание чувствительности пикселов по полю (рис. 4.3.2) с целью подавления, так называемого, геометрического шума (*FPN – Fixed Pattern Noise*), выражающегося в различных коэффициентах преобразования светового потока в различных пикселах [36], [246].

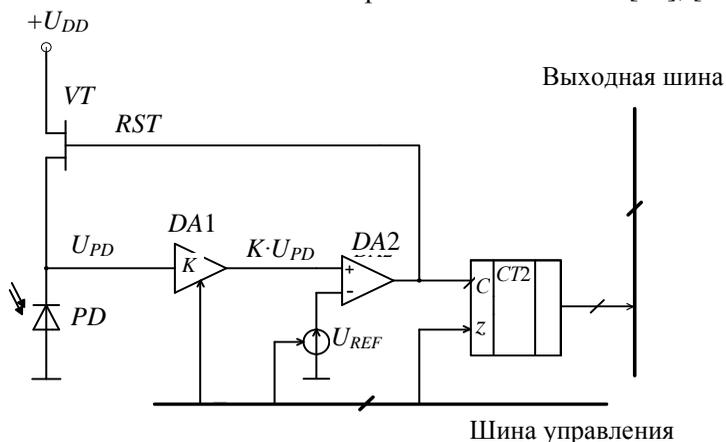


Рис. 4.3.2. Цифровой пиксел с преобразованием сигнал-частота и регулируемым размером групп фотогенерированных электронов (регулируемым коэффициентом усиления)

Концепция смешанного аналого-цифрового накопления качества информации в силу универсальности КМОП технологии (в отличие от технологии ПЗС) применима не только к матричным фотоприёмникам, но и к приборам с ВЗН. Если в технологии ПЗС режим ВЗН обеспечивает только увеличение амплитуды слабых сигналов, но в рамках конкретной ёмкости пиксела не обеспечивает

роста контрастной чувствительности, то в КМОП фотоприёмниках с режимом ВЗН при накоплении цифровых сигналов контрастная чувствительность будет увеличена на порядок [36]. Другим решением по аналогии с вычитанием темнового кадра для коррекции геометрического шума матрицы цифровых пикселей было бы умножение кадра на матрицу нормировочных коэффициентов для полного исключения геометрических шумов цифровыми методами.

Требуемые для реализации цифровых пикселей нормы точности зависят не только от желаемых площади фотодиода и количества интегрированных в пиксел транзисторов, но и от предполагаемого тиража СБИС. Так как потребности в фотоприёмных СБИС для космического телевидения (в первую очередь оборонного назначения) на несколько порядков меньше, чем для массовых систем охраны или мобильных телефонов, то компромиссный размер пикселя для систем космического телевидения составляет 15×15 мкм. Предельная контрастная чувствительность в сочетании с высокой чувствительностью достигается при цифровом пикселе высокой разрядности и обратной засветке (рис. 4.3.3). Тогда вся площадь 225 мкм^2 используется для размещения усилителя, компаратора, 24-разрядного регистра памяти и блока управления считыванием.

Технологической особенностью создания пикселя с обратной засветкой является необходимость утонения кремниевой пластины до 4...6 мкм. Схемы усиления сигнала, компаратор и счётчик формируются в специальных технологических областях, изолирующих цифровые схемы от фотоэлектронов в толще подложки областью пространственного заряда, созданной двойным последовательным инвертирующим легированием. При этом за счёт высокоэнергетического легирования в подложке формируется встроенное поле для переноса фотогенерированных электронов к противоположной поверхности. Во время экспозиции кадра при достижении усиленным сигналом установленного значения напряжения блок управления формирует сигнал сброса, обнуляющий накопленный заряд фотодиода, и увеличивает значение счётчика на единицу.

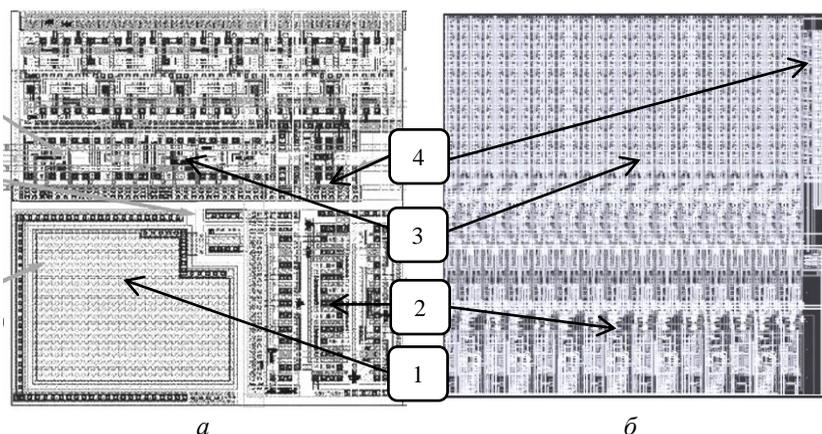
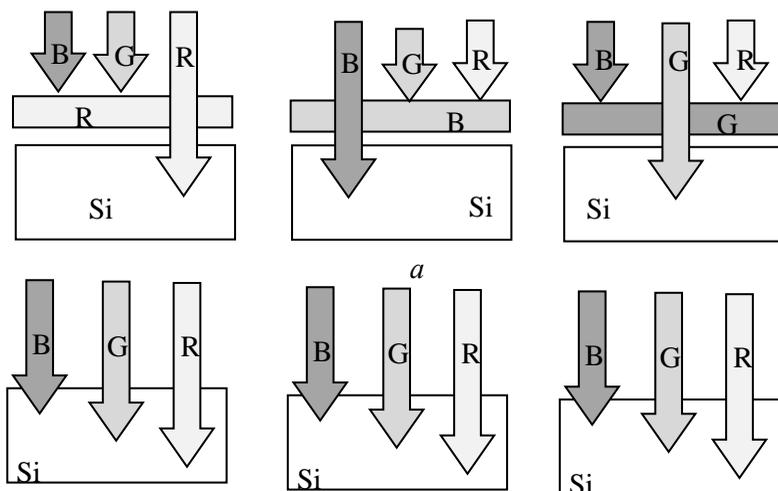


Рис. 4.3.3. Топология цифрового пиксела при засветке: прямой – *a*; обратной – *б* (фотодиод сформирован по всей площади пиксела с обратной стороны кристалла); 1 – фотодиод, 2 – компаратор, 3 – счётчик, 4 – узел управления

Кроме того потребуется организация передачи достаточно большого объёма данных по параллельным цифровым шинам, проходящим над цифровыми схемами. Для хранения одного бита информации по КМОП технологии 180 нм требуется около 4 мкм², то есть самый большой блок цифрового пиксела займет порядка 100 мкм², ещё столько же в сумме займут блоки управления, усилитель и компаратор, что подтверждает возможность реализации на этой технологии фотоприёмников с разрешением 1...4 мегапиксела. Для более высокого разрешения необходимо последовательно переходить к КМОП технологиям с проектными нормами 90, 65 и 45 нм.

Многоспектральные матричные КМОП фотоприёмники при реализации линейных приборов и с режимом ВЗН, как и в настоящее время, будут использовать спектральные фильтры (интерференционные решётки). В матричных приборах спектральные фильтры, например по системе Байера, будут использоваться только во внутриотсечных телекамерах в силу малой радиационной стойкости. В забортных телекамерах длительной эксплуатации на орбите перспективны многоспектральные фотоприёмники с внутренним цветоделением [36], [156], [247] (рис. 4.3.4, б).

Пиксел таких матриц (рис. 4.3.5) традиционно имеет три отдельных выхода для каждого из компонентов цветового сигнала – голубого, зелёного, красного.



б

Рис. 4.3.4. Сравнение принципов цветоразделения: *а* – с помощью спектральных фильтров; *б* – с помощью разделения по глубине поглощения фотонов разной длины волны

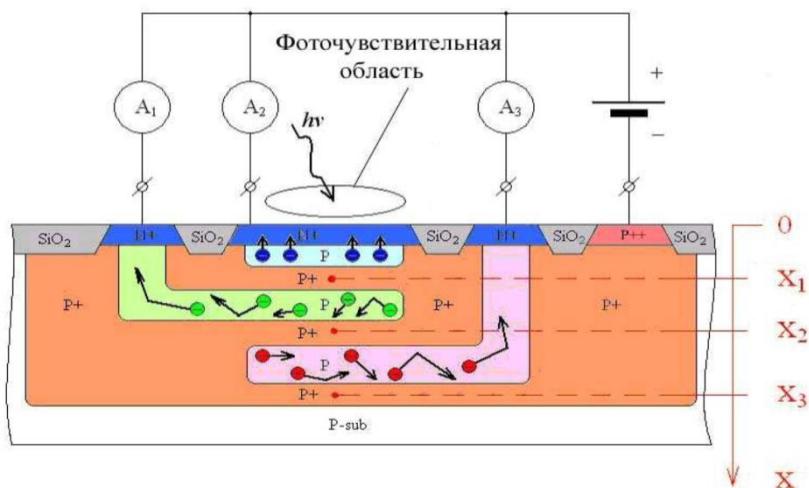


Рис. 4.3.5. Разрез фотоприёмной структуры с внутренним цветоразделением: STI – поверхностная изоляция SiO_2 ; NP – зона легирования канала сбора поверхностных носителей; PP – зона легирования контакта к охранной зоне пиксела; PW – легирование охранной зоны по границе пиксела; SBB – зона легирования барьера между средними и глубокими носителями; NM – легирование канала сбора средних носителей

Разделение цветовых компонентов близко к цветочувствительности человеческого глаза, о чём свидетельствуют относительные спектральные характеристики квантовой эффективности η (рис. 4.3.6).

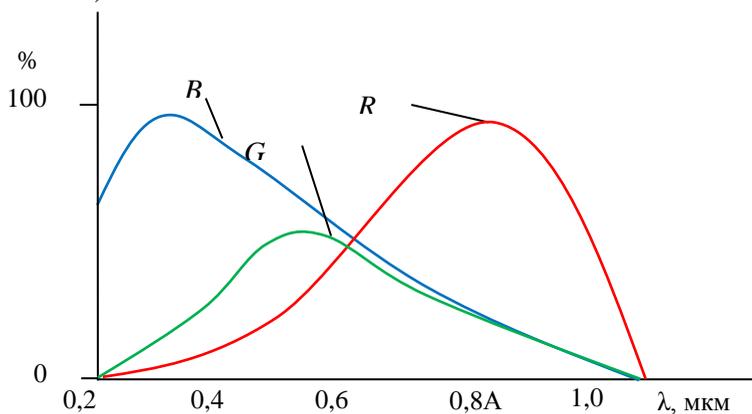


Рис. 4.3.5. Относительные спектральные характеристики матрицы

На основе разработанной конструкции пиксела созданы несколько вариантов фотоприёмников с разрешением от $320 \times 240 \times 3$ до $800 \times 612 \times 3$ [247], что эквивалентно разрешению от 0,3 до 2,1 мегапиксела с байеровским фильтром. Все они имеют встроенный в пиксел процессор, производящий предварительную обработку видеосигнала и доведение его до стандартного формата.

Исследования этих фотоприёмников выявили их преимущества: сильное ослабление муара на периодических рисунках; лучшая цветопередача, особенно заметная на близких цветовых оттенках; простая реализация черно-белого режима за счёт суммирования аналоговых сигналов непосредственно в пикселах, что обеспечивает повышенную чувствительность в этом режиме [247].

Перспективным свойством внутреннего цветоделения является возможность без потери разрешающей способности создать в зоне поглощения кремния глубокие изолирующие карманы для формирования четвёртого диапазона в ближнем ИК диапазоне спектра. Кроме того, будут реализованы фотоприёмные матрицы без специальных спектральных светофильтров с пятью спектральными каналами: пятый УФ спектральный диапазон будет сформирован на поверхностном поликремниевом фотодиоде вне кремниевой подложки [156].

Особенностью КМОП фотоприёмников является то, что все функции телевизионной камеры, включая цифровую обработку видеосигнала, интегрированы практически на один кристалл, который получил название **видеосистемы на кристалле** (в англоязычной литературе это называется концепцией «*Camera-on-Chip*», т. е. «камера на кристалле»). Понятие видеосистемы значительно шире, чем телевизионной камеры, т. к. видеосистема может включать в свой состав сложные процессоры обработки видеосигнала. Известны концепции видеосистем на кристалле различных классов, которые обеспечат повышение быстродействия и надёжности ключевых СБИС космической видеоинформатики:

- с фотоприёмным массивом пикселей и с параллельным кодированием видеоинформации [219], реализованной предпосылкой к которым являются фотоприёмные матрицы с множеством столбцовых АЦП [36], [218] и матрицы с двумя группами АЦП (расположенными с различных сторон фотоприёмного массива): первая группа скоростных АЦП с умеренным числом разрядов, вторая – с меньшим быстродействием, но с большим числом разрядов [248];

- с объединением фотоприёмного массива, набора столбцовых АЦП и устройства вычисления координат объектов для астродатчиков [35];

- на основе многоспектральных фотоприёмных матриц с глубинным цветоделением и с принятием решений об обнаружении объектов заданного спектрального класса (см. [139], [249], раздел 2.2).

Интегрирование дополнительных функций, помимо оптимального фотоэлектрического преобразования, позволяет решить проблемы передачи больших массивов видеоданных между отдельными узлами телевизионной системы. Так, например, в звёздных датчиках выходными данными является не изображение, а весьма ограниченный массив координат звёзд или космических объектов, который может быть сформирован непосредственно на преобразователе с использованием известных алгоритмов определения центров тяжести малоразмерных объектов.

Уже на сегодняшний день известны видеосистемы на кристалле, реализующие такой подход к проектированию телевизионных систем [156], однако в ближайшее время следует ожидать появления полноценных видеосистем, точность и скорость работы которых будет не уступать существующим распределённым системам.

Повышение степени интеграции и расширение функциональных возможностей КМОП фотоприёмников являются шагом к появлению четвёртого поколения сенсоров подобного типа – так называемых КМОП фотоприёмников с интеллектуальным или смарт пикселом. В данных фотоприёмниках часть функций по обработке видеосигнала будет реализовываться непосредственно в процессе фотоэлектрического преобразования.

Возможность считывания отдельных окон интереса (*Region-of-Interest, ROI*) в КМОП фотоприёмниках, неразрушающего считывания видеосигнала и анализа локальной освещённости по скорости нарастания видеосигнала позволят в ближайшем будущем реализовать концепцию формирования *нескольких видеосистем на одном кристалле*, каждая из которых реализует свои параметры разложения – число пикселей по горизонтали и вертикали, кадровую частоту, поле зрения, время накопления и т. д. Причём поля зрения каждой из систем будут пересекаться.

При **навигации спускаемых аппаратов**, в частности, при посадке на лунную поверхность, актуальна задача привязки координат наблюдаемых объектов к меридиональной и широтной сетке. Точность привязки определяется, в основном, остаточными погрешностями стабилизации КА, обусловленными динамикой управления полётом, а также точностью интегрированных бортовых навигационных систем, включающих звёздные и солнечные датчики, построители местной вертикали (датчики горизонта) и др. [254]. Для решения проблемы сопряжения телевизионной системы и навигационных датчиков в условиях нестабильности ориентации КА необходимо устранение инструментальных ошибок, вызываемых несогласованностью оптических осей, частоты и фазы опроса телевизионной аппаратуры и навигационного прибора. Для этого целесообразно объединение телевизионной системы и датчика горизонта в единую конструкцию (рис. 4.3.7) аналогично оптико-механическим построителям местной вертикали, используемым при спуске КА на участке программного полёта до входа в атмосферу.

Прецизионные построители местной вертикали имеют центральную и периферийную оптические системы; в них «центральная оптическая система используется космонавтом для курсовой ориентации КА по "бегу" изображения земных предметов» [255]. Комбинированная система с коаксиально расположенными широкоугольной и узкоугольной оптическими системами [250] (рис. 4.3.7) с полями зрения (рис. 4.3.8), обеспечивающими и детальное наблюдение подспутниковой зоны и горизонта, позволяет исключить

инструментальные ошибки сопряжения систем как по визирным осям, так и по частоте и фазе получаемых изображений, и имеет перспективы применения в системах навигации автоматических спускаемых на Луну аппаратов.

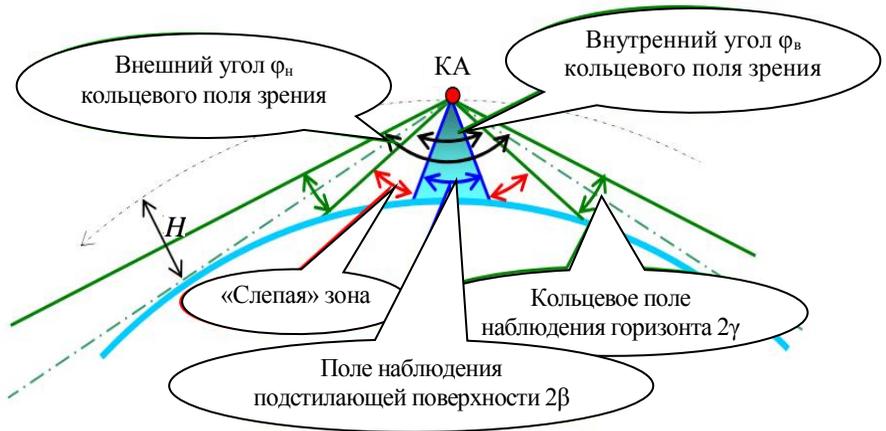


Рис. 4.3.7. Схема одновременного наблюдения подстилающей поверхности Земли и горизонта

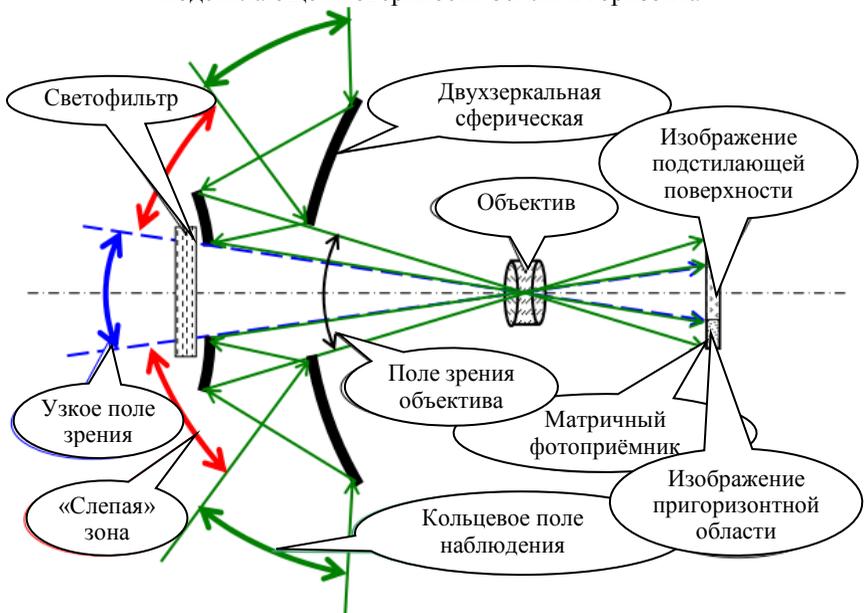


Рис. 4.3.8. Оптическая схема с коаксиально расположенными широкоугольной и узкоугольной оптическими системами

Резюмируя ближайшую перспективу технологического развития космического телевидения, нужно подчеркнуть, что следующие этапы действия программы развития ЭКБ в рамках ФЦП ОПК должны учитывать необходимость проведения работ в обеспечение космических систем радиационнотойкой ЭКБ, а в рамках ФЦП ЭКБ и радиоэлектроники учитывать коммерческое и двойное применение технологий и изделий. В плане развития космической ЭКБ для видеоинформационных систем часть разработок технологий фотоприёмников целесообразно сосредоточить в рамках ФЦП ЭКБ и радиоэлектроники. При этом следует ориентироваться на обеспечение не просто сокращения разрыва в уровне микроэлектроники с ведущими странами, но и выделение ряда перспективных изделий, в которых можно получить новое, отсутствующее в зарубежных системах качество систем и информации, доставляемой ими (в первую очередь – рассмотренных выше). Норберт Винер утверждал, что уже много есть специалистов, которые в области радиоэлектроники «знают, как», но очень мало людей, которые «знают, что» (что делать). Сегодня ведущие отечественные специалисты видеоинформационной техники уже знают, «что делать» и, в основном, знают, «как делать». Для того, чтобы это знание «как делать» стало достаточным для вывода отечественной видеоинформационной техники на самый передовой уровень, целесообразно в ФЦП выделить определённую часть средств на проведение НИР, ориентируясь на то, что паритет между вооружениями США и СССР поддерживался, в том числе и тем, что у нас на предприятиях ОПК финансирование ОКР составляло примерно 70%, НИР – около 30%.

Предлагаемые меры позволят в обозримом будущем существенно повысить качество информации, получаемой от космических видеоинформационных систем. Только при сочетании усилий в области создания систем и в области совершенствования технологии создания их компонентов можно рассчитывать на сокращение отставания России от других государств, снизить объём импорта и укрепить безопасность страны. При этом не следует пытаться «догнать Запад», необходимо ставить собственные крупные технологические задачи и решать их, ориентироваться не на «импортозамещение», а на *импортнезависимость* [38]. Для этого в отечественной промышленности имеется определённый задел, но потребуется государственная поддержка, которая должна быть предусмотрена в ходе формирования следующих этапов Федеральных целевых программ. Реализация перспективных

космических видеоинформационных систем силами отечественной промышленности должна стать стратегической целью во имя обеспечения военной, экономической и информационной безопасности страны.

Технологии **космической связи** позволят наращивать пропускную способность каналов связи при наличии физических ограничений на широкополосность, на мощность и размеры антенн (имеющим различные требуемые значения при различных длинах волн электромагнитного излучения). При этом приборы нового поколения будут существенно мощнее и эффективнее существующих, размещаемых в одной из точек Лагранжа на расстоянии 2 миллиона километров от Земли, где гравитация Солнца и Земли позволят ему находиться почти без движения. Новые приборы уже в ближайшем будущем позволят передавать на расстояние в 2 млн. км информацию с суммарной скоростью в 1200 мбит/сек, что на порядок превышает среднюю скорость подключения к сети Интернет [256].

Учёт специфики различий распространения радиоволн в космическом пространстве и на трассах орбитальный спутник–наземная станция приёма телевизионных сигналов позволяет прогнозировать создание составной линии: сначала по сверхширокополосной многоканальной линии (с адаптацией по каждому из каналов в режиме *n-OFDM*) видеоинформация будет доставлена на высокоорбитальный спутник, затем она будет транслироваться (в соответствующем формате с учётом особенностей прохождения радиоволн) на наземные пункты по нескольким независимым каналам радиосвязи.

В соответствии с прогнозом К. Э. Циолковского, сделанным в 1896 г., космическая связь будет использовать оптические каналы. Уже в 2012 г. с Российского сегмента МКС впервые по лазерному каналу была передана широкополосная информация на наземный пункт (объемом 2,8 Гигабайт со скоростью 125 Мбит/с). Межспутниковые лазерные системы передачи информации уже работают со скоростью до 600 Мбит/с и дальностью действия от 1 до 6 тыс. км (для связи низкоорбитальных КА) и от 30 до 46 тыс. км (для связи низкоорбитальных КА с геостационарным) [257]. В обозримой перспективе широкополосная лазерная связь обеспечит космонавтику во всей Солнечной системе.

Широко обсуждаемые технологии «**дополненной реальности**» (англ. *augmented reality*, *AR* – «расширенная реальность»), результат введения в поле восприятия любых сенсорных данных с целью

дополнения сведений об окружении и улучшения восприятия информации) в космическом телевидении применяются давно и широко: достаточно взглянуть на рис. 3.4.1 – 3.4.3, 3.4.17, иллюстрирующие «дополненную реальность», наблюдаемую космонавтами в процессе контроля сближения и стыковки КА. Эта ситуация лидерства космической техники во внедрении новых технологий не является исключением: даже цифровая связь в телевидении впервые была реализована в высокоорбитальных системах предупреждения о ракетном нападении (см. рис. 1.2.27) [37].

4.4. Примеры перспективных проектов

Технологические достижения будут дополнены новыми системными принципами, в частности, будут использоваться системы, реализующие адаптацию к динамике сюжета ([76], раздел 2.4), позволяющие благодаря взаимнообмену чёткости и кадровой частоты на разных дистанциях наблюдения минимизировать динамический промах при измерении пространственно-временных координат объектов; системы, реализующие телевизионно-лазерную локацию, позволяющую, благодаря импульсному лазерному излучению, сразу во всём поле зрения телекамеры (без сканирования по азимуту, но со сканированием по дальности) с высокой скоростью измерять азимут и дальность до объектов [36].

Широкое распространение получают **космические роботы**. В частности, РКК «Энергия» совместно со смежными организациями ведутся разработки (проект «Косморобот») по созданию автоматизированных механических системы космического назначения [258], будут созданы подвижные роботы, перемещающиеся по поверхности МКС (рис. 4.4.1) [258], а на её внешней поверхности будет создана рука-манипулятор (рис. 4.4.2) [259].

Робот сможет перемещаться по внешним поручням НЭМ, переносить грузы и выполнять различные манипуляции, в том числе устанавливать и снимать оборудование, соединять электрические кабели, «осматривать» через телекамеры внешнюю поверхность модуля. Для отработки алгоритмов управления, необходимых для выполнения различных операций, в РКК «Энергия» будет создан специальный наземный моделирующий стенд. В состав новой платформы войдут специальный мобильный робот, пульта управления, средства интеграции и наземный сегмент. Конструкция собственно робота предусматривает наличие базового модуля, блока аккумуляторных батарей, двух манипуляторов, опорного узла, обзорных (широкоугольных), узкоугольных телекамер,

стереоскопической телевизионной системы и приёмо-передающего устройства.

В зависимости от типа поставленной задачи «Косморобот» сможет нести определённые инструменты: в их число входят активный адаптер полезной нагрузки, средство для взятия проб-мазков, гайковёрт, ножницы, инструмент для стыковки электрических соединителей, хват для фиксации на поручнях и универсальный хват [259]. Телекамеры системы технического зрения будут установлены не только на корпусе косморобота, но и непосредственно на его манипуляторах, имеющих семь степеней подвижности [260]. Косморобот сможет действовать автономно или помогать космонавтам во время выходов в открытый космос. Испытания «Косморобота» планируется начать на МКС в 2020 г. Система будет тестироваться в составе научно-энергетического модуля (НЭМ) российского сегмента орбитального комплекса [242].



Рис. 4.4.1. Макетный образец космического робота



Рис. 4.4.2. Рука-манипулятор

Системы ДЗЗ и разведки будут вести с широкого диапазона орбит глобальное наблюдение Земли с разрешением до долей метра не реже раза в сутки, обеспечивая все потребности цивилизации во всех диапазонах длин волн [67]–[69] (от рентгеновского и «вакуумного» ультрафиолетового диапазонов, включая видимый и ближний инфракрасный диапазон, и до дальнего инфракрасного диапазона вплоть до терагерцового [261], который будет использовать, в частности технологию микроболометрического детектирования излучения, отработанную при создании ИК фотоприёмников). При контроле чрезвычайных ситуаций и театров военных

действий будут широко применяться космические телевизионные системы с перенацеливаемыми кадровыми системами, позволяющими детально анализировать динамику развития событий [38].

Космонавтика XXI века намечает ряд крупных проектов, среди которых лунные станции, обеспечивающие стереобазу наблюдения, равную диаметру Луны. Как предсказывал И. С. Шкловский [264], должны появиться системы наблюдения со стереобазой не только размером с расстояние от Земли до Луны, но порядка астрономической единицы (150 миллионов км) – расстояния от Земли до Солнца. Многие из этих проектов будут иметь если не основной, то дополнительной смысловой нагрузкой решение проблемы кометно-метеоритной опасности Земли [29]. Примером таких систем является телевизионная система проекта Орбитальная звёздная стереоскопическая обсерватория (ОЗСО) [128], [244].

Орбитальная группировка КА формируется путём установки двух идентично оснащённых КА в окрестностях тригональных лагранжевых центров либрации L_4 , L_5 в системе Солнце–«барицентр системы Земля+Луна» (рис. 4.4.3) [244], [245]:

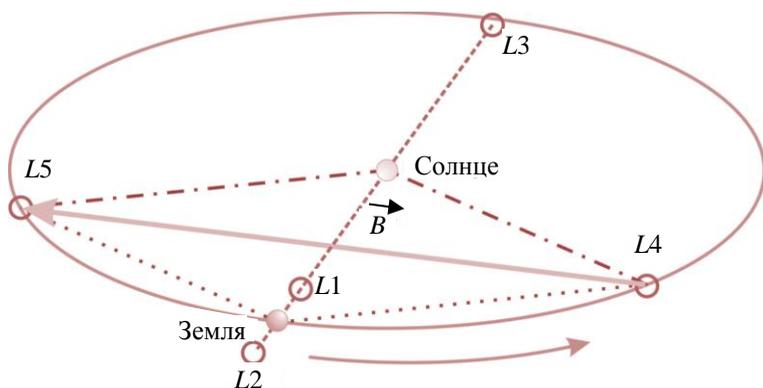
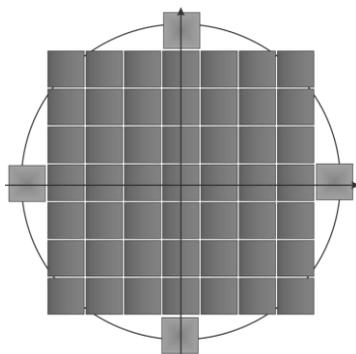


Рис. 4.4.3. Два КА расположены в западной L_4 и восточной L_5 точках, положение которых определяется текущим положением Земли в орбите

Пространственное расположение КА в эклиптике в окрестностях центров, расстояние между которыми составляет величину $B \approx 260$ млн. км, имеет неоспоримые преимущества для эффективного применения принципа синхронной триангуляции и стереоскопии перед КА на околоземных орбитах, производящими наблюдения с одного направления – прежде всего, в решении задач проблемы АКО и проблем физики Солнца [244], [245].

Синхронная работа двух идентичных астрографов, установленных на концах базы B , в комбинации с режимом раздельного наблюдения каждым из телескопов, исключает «слепые» для земного наблюдателя (находящиеся за Солнцем) участки орбит практически для всех классов объектов, сближающихся с Землей.

Архитектура оптикоэлектронной части проекта [244], [245] основывается на использовании в фокальной плоскости мозаик матриц, стыкуемых без существенных зазоров [70] (пикселями покрыто 85% поверхности сборки – с учётом промежутков для монтажа матриц). Перспективен вариант мозаики (рис. 4.4.4) из 49 квадратных матриц форматом 4К×4К с квадратными пикселями со стороной 10 мкм и с аналогичными 4 матрицами для адаптивного управления вписан в круг диаметром 350 мм.



Площадь поля зрения – 889 см²
 Число элементов в мозаике – 0,89 Гп
 Объём информации одного сжатого кадра – 4,7 Гбит
 Время экспозиции – ≤ 5 мин
 Время передачи кадра при $C = 16$ Мбит/с – ≤ 5 мин
 Точность астрометрическая в кадре – ± 0.0007"
 Точность фотометрии не хуже ± 0.05^m
 Предельная звездная величина – 25^m
 Скорость обзора – до 15 кадров в час (при 2 мин экспозиция + 2 мин перенацеливание)

Рис. 4.4.4. Схема фокальной сборки из 49 матриц и её параметры

Для реализации подобных амбиционных проектов необходимо создание в России технологии производства и сборки мозаик утонённых матриц с обратной засветкой требуемого размера и качества, с необходимым уровнем радиационной стойкости. Разработка систем такого класса для наблюдения в видимой [70] и ИК областях спектра [27] актуальна не только для научных исследований и предупреждения о кометно-метеоритной опасности [29], но и для обороны страны [5]–[8], [26], [27], [38] [242], [243].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Космическое телевидение – это отрасль радиосвязи, начавшей свою историю с грозоотметчика А. С. Попова. Сегодня космическое телевидение – это «грозоотметчик», «вулканотметчик» и вообще «универсальный отметчик» событий во многих уголках Солнечной системы, включая и Землю, на которую теперь можно пристально смотреть и извне. Рождение космического телевидения в год столетия со дня рождения А. С. Попова ознаменовало начало эры глобальной радиосвязи. Рождение космического телевидения в XX веке явилось началом эры глобальной информатизации и дало толчок к возникновению нового понятия «геоинформатика». Глобальную информатизацию на основе телевидения, космоса и компьютеров люди должны и могут направить в русло познания и созидания.

Как и предвидел ещё до рождения космического телевидения создатель электронного телевидения В. К. Зворыкин, беспилотная космонавтика по потокам видеоинформации будет опережать пилотируемую. Отечественное космическое телевидение, история которого началась более 60 лет назад с королёвского ТЗ, и накопившее множество мировых рекордов, – ярчайшая страница отечественной истории, имеющая по дате рождения и ряду крупнейших результатов мировой приоритет. Эти достижения мы не вправе забывать. Но у нашей телевизионно-космической отрасли есть не только прошлое, но также настоящее и будущее, есть практически не ограниченная перспектива. Настоящее – летающие на орбитах космические аппараты с телевизионной аппаратурой на борту, наземные комплексы и люди, которые всё это создали. Будущее космического телевидения определяется тем, что большинство новых крупных проектов в космосе предполагает телевидение в качестве главного компонента. Развитие космического телевидения связано с тремя важнейшими частями – новыми целями, новой технологией и новыми результатами. Новые цели формулируются специалистами в своей предметной области, новые технологии – дело рук создателей систем, а результаты – общее достояние.

Теория и практика космического телевидения должны и будут развиваться в направлении повышения *качества видеоинформации*. Вослед освоению понятия качества синтаксической информации

теоретики приступят к формализации качества семантической информации. Философия космонавтики, и космического телевидения в частности, может стать лидером в переосмыслении глобальных целей цивилизации. Начало этого процесса видно, например, из того, что С. Лем хотя и утверждал, что «героическая атака на материю – девиз человечества», но идея «атаки» вторична, первично познание, и не зря С. Лем писал, что «*всё сущее есть информация*», а физики восприняли этот тезис, породивший концепцию Дж. Уилера «*всё из бита*». Остаётся уточнить, что, хотя без синтаксической информации семантическую не передать, но всё же важнее идея «всё из семантического бита», «*всё из образа*».

Технология космического телевидения, опирающаяся на начальном этапе на электронно-лучевые фотоприёмники и ставшая сегодня твердотельной, в пределах горизонта предсказуемости будет совершенствоваться в направлении увеличения форматов (полей зрения), абсолютной и контрастной чувствительности, увеличения разрешающей способности по всем аргументам – пространству, времени, длине волны принимаемого излучения. В частности, наблюдение Земли из космоса обеспечит наблюдение на всех длинах волн, для которых атмосфера прозрачна (от ближнего ультрафиолетового диапазона до дальнего инфракрасного диапазонов), с разрешением в ближайшей перспективе около 1 м, в более отдалённой до 0,1 м, с периодичностью не реже раза в сутки, а для контроля особо важных регионов будут сформированы орбитальные группировки для наблюдения динамичных объектов с помощью телевизионных систем с кадровым накоплением.

Практика космического телевидения станет всеохватной и не останется направлений деятельности на Земле и в космосе, которым оно не будет способствовать – в хозяйстве, науке, обороне: хотя С. П. Королёв и относил оборонный сегмент к тактическим вопросам развития цивилизации, история показывает, что *сузубо* «мирный космос» находится за горизонтом предсказуемости.

Перспективы космического телевидения связаны не только с возможностями, но и с потребностями, которые цивилизация постоянно порождает и удовлетворяет. Человечество никогда не заявит, что оно знает всё, и что космос его больше не интересуется. Знание – это не просто сила, а власть над будущим. В эпоху глобальной информатизации без знаний, получаемых из космоса, невозможно гармоничное развитие общества. Именно поэтому ведущие космические державы сегодня усиленно пропагандируют

космическую технику, особенно среди студентов и школьников. Развитие космической индустрии России непременно должно включиться и молодое поколение нашей страны.

Для реализации перспектив космического телевидения предстоит решить ряд проблем, среди которых необходимо выделить создание не только ряда прорывных технологий в оптико-электронных системах, но и возрождение отечественной микроэлектронной базы, существенно отставшей от мирового уровня. Космическое телевидение, призванное внести важный вклад в обеспечение информационной безопасности страны, нуждается в широкой номенклатуре отечественных КМОП СБИС, построенных как системы на кристалле и видеосистемы на кристалле, обеспечивающие эффективное кодирование световых и электрических сигналов и длительную эксплуатацию на орбите в условиях космической радиации.

Однозначно можно сказать, что будет нарастать *количество и качество видеoinформации*, добываемой космическим телевидением, необходимой для обеспечения развития хозяйства и обороны страны. И это нарастание количества и качества видеoinформации будет соответствовать современным взглядам на космонавтику, которая должна стать не только космономикой, то есть приносить ощутимый хозяйственный эффект, но и стать пространством мечты и стратегического прогноза.

**Космическое телевидение –
это мощный инструмент познания,
предмет нашей законной национальной гордости,
это – слава России.**

Литература

1. Брацлавец П. Ф., Росселевич И. А., Хромов Л. И. Космическое телевидение. М.: Связь, 1967. 2-е изд. 1973. 248 с.
2. Творческое наследие Сергея Павловича Королёва. Избранные труды и документы. Под ред. М. В. Келдыша. М.: «Наука», 1980. 592 с.
3. Космонавтика XXI века / Под ред. Б. Е. Чертока. М.: «РТСофт», 2010. 864 с.
4. Черток Б. Е. Ракеты и люди Кн.1–4. М. 1994–1999.
5. Динамика радиоэлектроники / Под ред. Ю. И. Борисова. М.: Техносфера, 2007. 400 с.
6. Динамика радиоэлектроники-2 / Под ред. Ю. И. Борисова. М.: Техносфера, 2008. 376 с.
7. Динамика радиоэлектроники-3 / Под ред. Ю. И. Борисова. М.: Техносфера, 2009. 392 с.
8. Оптико-электронные системы и лазерная техника. Энциклопедия XXI век. Оружие и технологии России / Под ред. С. Б. Иванова. М.: Дом «Оружие и технологии». 2005. 720 с.
9. Кульба В. В., Микрин Е. А., Павлов Б. В., Платонов В. Н. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов / Под ред. Е. А. Микрина. М.: Наука, 2006.
10. Микрин Е. А. Бортовые комплексы управления космических аппаратов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 245 с.
11. Малые космические аппараты информационного обеспечения / Под ред. В. Ф. Фатеева. М.: Радиотехника, 2010. 320 с.
12. Разработка систем космических аппаратов / Под ред. П. Фортескью, Г. Суайнерда, Д. Старка. М.: Альпина Паблишер, 2016. 764 с.
13. Эйкхофф Й. Бортовые компьютеры, программное обеспечение и полётные операции. Введение. М.: Техносфера, 2014. 450 с.
14. Дворкович В. П., Дворкович А. В. Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика). М.: Техносфера, 2012. 1008 с.
15. Арбатов А. Г., Васильев А. А., Велихов Е. П. Космическое оружие: Дилемма безопасности. М.: «Мир», 1986. 181 с.
16. Шовенгардт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
17. Зубарев Ю. Б., Кривошеев М. И., Красносельский И. Н. Цифровое телевизионное вещание. М.: НИИ Радио, 2001. 568 с.
18. Сагдуллаев Ю. С., Абдуллаев Д. А., Смирнов А. И. Основы телевизионного контроля процесса сближения космических аппаратов. Ташкент: ФАН, 1997. 127 с.
19. Сагдуллаев Ю. С., Смирнов А. И. Ковин С. Д. Основы телевизионных измерений параметров сближения космических аппаратов М.: “Спутник +”, 2014. 107 с.

20. Селиванов А. С. Очерки истории и техники космического телевидения. Воспоминания разработчика. М.: ИД «Медиа Паблишер», 2010. 192 с.
21. Телевизионная съёмка кометы Галлея / Г. А. Аванесов, Я. Л. Зиман, В. И. Тарнопольский и др. М.: Наука, 1989. 295 с.
22. Телевизионное исследование Фобоса / Г. А. Аванесов, Б. С. Жуков, Я. Л. Зиман и др. М.: Наука, 1994. 168 с.
23. Меньшаков Ю. К. Техническая разведка из космоса. М.: Academia, 2013. 656 с.
24. Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В. Космическая электроника. В 2 кн. М.: Техносфера, 2015.
25. Формозов Б. Н. Аэрокосмические фотоприёмные устройства в видимом и инфракрасном диапазонах / СПб.: СПбГУАП, 2002. 121 с.
26. Власко-Власов К. А. От «Кометы» до «Око». М.: «Ольга», 2002.
27. Иванов В. Г., Каменев А. А. Применение широкоформатных инфракрасных матричных фотоприёмных устройств в оптико-электронных средствах наблюдения за космической обстановкой. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2015. 227 с.
28. Малинецкий Г. Г., Тимофеев Н. С. О методологии прогноза развития аэрокосмического комплекса // Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша. 2012. № 72. 16 с. URL: <http://library.keldyshru/preprint.asp?id=2012-72>.
29. Шустов Б. М. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. Физматлит, 2010. 384 с.
30. Бакланов А. И. Фотоприёмники ПЗС космических систем наблюдения высокого разрешения // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения¹. 2012. Вып. 2. С. 3–19.
31. Алымов О. В., Степанов Р. М. Создание и развитие школы фотоэлектроники в Ленинграде – Санкт-Петербурге / Петербургская–Ленинградская школа электроники. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. С. 591–605.
32. Вишневецкий Г. И., Четвергов М. В. Кадровые и ВЗН фотоприёмники для космических систем. Матер. XIII НТК «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли» (Сочи, 12–18 сент. 2016). Калуга: Манускрипт, 2016. С. 280–282.
33. Твердотельное телевидение /Л. И. Хромов, Н. В. Лебедев, А. К. Цыцулин и др. М.: Радио и связь, 1986. 184 с.
34. Хромов Л. И., Цыцулин А. К., Куликов А. Н. Видеоинформатика. М.: Радио и связь, 1991. 192 с.
35. Твердотельная революция в телевидении: Телевизионные системы на основе приборов с зарядовой связью, систем на кристалле и видеосистем на кристалле / Под ред. А. А. Умбиталиева и А. К. Цыцулина. М.: Радио и связь, 2006. 312 с.

¹ Далее – ВРЭ.

36. Твердотельные телекамеры: накопление качества информации/ Цыцулин А. К., Адамов Д. Ю., Манцветов А. А и др.// СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 272 с.
37. Цыцулин А. К. Телевидение и космос. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. 228 с., 2014. 238 с.
38. Люхин А. В., Умбиталиев А. А. Задачи космических оборонных видеоинформационных систем. ВРЭ. 2013. Вып. 2, с. 3–14.
39. Умбиталиев А. А., Цыцулин А. К. Пятьдесят лет космического телевидения. ВРЭ. 2009. Вып. 1. С. 3–26.
40. История космического телевидения в воспоминаниях ветеранов. Приложение к ВРЭ. 2009. Вып. 1. 139 с.; см. <http://www.niitv.ru>
41. Достижения и перспективы отечественного космического телевидения/ Умбиталиев А. А., Цыцулин А. К., Кузичкин А. В. и др.// ВРЭ. 2016. Вып. 2. С. 3–17.
42. Бачевский С. В. Точность определения дальности и ориентации объекта методом пропорций в матричных телевизионных системах. ВРЭ. 2010. Вып. 1. С. 57–66.
43. Умбиталиев А. А., Цыцулин А. К., Шипилов Н. Н. Динамика развития передающей телевизионной техники / Динамика радиоэлектроники-3 / Под ред. Ю. И. Борисова. М.: Техносфера, 2009. С. 161–172.
44. «...Был веку нужен Королёв» /Сост. Л. А. Филина. М.: «Русская история», 2002. 208 с.
45. Ивановский О. Г. Ракеты и космос в СССР: записки секретного конструктора. М.: «Молодая гвардия», 2005. 320 с.
46. Лычёв Е. Н. Даты и события космонавтики. СПб.: «Галлея Принт», 2005. 128 с.
47. Дариус Дж. Недоступное глазу. М., Мир, 1986. 249 с.
48. Селиванов А. С. Космос – миру. Телевизионные системы исследования планет. М., «Знание». 1990. 64 с.
49. Кондратьев К. Я., Крупенио Н. Н., Селиванов А. С. Планета Венера. Л.: Гидрометиздат, 1987. 278 с.
50. Селиванов А. С. Космические фототелевизионные устройства // История телевидения. 1998. № 1. С. 12–32.
51. Мультипроцессорная технология межотраслевой обработки видеоданных, полученных системой «Ресурс-01» / Селиванов А. С. и др. // Исследования Земли из космоса. 1992. № 2. С. 82–90.
52. Телевизионные системы метеорологических ИСЗ / Б. И. Баранов, А. Е. Малькевич, В. М. Левин и др. // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. 1986. Вып.1. С. 56–63.
53. Малькевич А. Е., Ресовский В. А., Дедюрин Э. В. Телевизионная аппаратура космического аппарата «Электро» // Телевизионная техника и связь. 1995. С. 61–68.

54. Экоинформатика. Теория, практика, методы и системы / Под ред. В. Е. Соколова. СПб.: Гидрометиздат, 1992. 520 с.
55. Космическая съёмка Земли (спутники оптической съёмки Земли с высоким разрешением). / Под ред. А. А. Кучейко. М.: ИПРЖР, 2001. 135 с.
56. Григорьев А. А., Кондратьев К. Я. Космическое земледование. М.: Наука, 1985. 160 с.
57. Брюханов А. В., Господинов Г. В., Книжников Ю. Ф. Аэрокосмические методы в географических исследованиях. М.: Моск. ун-т, 1982. 232 с.
58. Кантор Л. Я., Тимофеев В. В. Спутниковая связь и проблемы геостационарной орбиты. М.: Радио и связь, 1988. 168 с.
59. Москаленко Е. И. Методы внеатмосферной астрономии. М.: Мир, 1984. 280 с.
60. Проект «Всемирная космическая обсерватория – ультрафиолет» / Шустов Б. М. Боярчук А. А., Моишеев А. А. и др // Ультрафиолетовая вселенная П. М.: Янус-К, 2008. 344 с.
61. Корякин А. В., Лутов И. О. Распознавание космических объектов по разнородной видовой информации. СПб.: ВИКУ им. А. Ф. Можайского, 2000. 115 с.
62. Телевизионная система мониторинга и определения параметров относительного движения космических объектов: концепция, архитектура, развитие / Г. В. Левко, А. А. Манцетов, П. С. Баранов и др.// ВРЭ. 2016. Вып. 2. С. 64–74.
63. Половко С. А., Вартанов В. Л., Козлов В. В. Помехоустойчивость телевизионно-компьютерных систем контроля сближения и стыковки космических аппаратов // ВРЭ. 2012. Вып. 1. С. 44–57.
64. Определение положения космических аппаратов путём обнаружения и сопровождения естественных конструктивных особенностей / Степанов Д. Н., Бахшиев А. В., Половко С. А. и др.// ВРЭ. 2016. Вып. 1. С. 3–19.
65. Кочетков В. И. Системы астрономической ориентации космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1980. 144 с.
66. Звёздные координаторы систем ориентации космических аппаратов / Аванесов Г. А., Воронков С. В., Форш А. А. и др. // Известия вузов. Приборостроение. 2003. Вып. 4. С. 66–69.
67. Основные принципы формирования и прогноз развития российской орбитальной группировки ДЗЗ в период до 2025 года / Белоног В. В., Данилюк А. Ю., Карелин А. В. и др. // Матер. XI НТК «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли» (Сочи, 13–18 сент. 2014). 2014. С. 13–16.
68. Емельянов А. А. Российская космическая система ДЗЗ. Сильные и слабые стороны. Перспективы развития. Матер. XIII НТК «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли» (Сочи, 12–18 сент. 2016). Калуга: Манускрипт, 2016. С. 13–17.

69. Перспективы развития орбитальной группировки КА ДЗЗ разработки АО «РКЦ «Прогресс» / А. Н. Кирилин, Р. Н. Ахметов, А. И. Бакланов и др. Матер. XII НТК «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли» (Сочи, 21–27 сент. 2015). Калуга, Манускрипт. 2015. С. 26–33.
70. Левко Г. В. Крупноформатные ПЗС и ПЗС мозаики (обзор). ВРЭ. 2013. Вып. 1. С. 34–48.
71. Катаев С. И. Возможность передачи телевизионной картины с помощью узкой полосы частот // Радиотехника. 1937. №2. С. 71–80.
72. Хромов Л. И. О некоторых способах передачи изображений с помощью узкой полосы частот // Телевизионная техника. 1958. Вып. 29. С. 82–102.
73. Цыцулин А. К., Ресовский В. А., Березин В. В. Космос и малокадровое телевидение // Информация и космос. 2005. № 2, С. 86 – 92.
74. Росселевич И. А., Зайцев В. П., Хромов Л. И. Выбор варианта системы на начальном этапе проектирования в малокадровом телевидении // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. 1982. Вып. 5. С. 3–8.
75. Умбиталиев А. А., Цыцулин А. К., Манцветов А. А. Принцип слитности изображений в прикладном телевидении. ВРЭ. 2012. Вып. 1. С. 3–15.
76. Статистический анализ и синтез прикладных телевизионных систем / Умбиталиев А. А., Пятков В. В., Цыцулин А. К. и др. // ВРЭ. 2015. Вып. 6. С. 4–14.
77. Цыцулин А. К. Развитие теории информации научной школой НИИ телевидения // ВРЭ. 2015. Вып. 3. С. 66–87.
78. Хромов Л. И., Ковригин А. Б., Мартынихин А. В. Принцип равновесного согласования в теории информации // ДАН. 1995. Т. 344. № 1. С. 30, 31.
79. Хромов Л. И., Цыцулин А. К. Основания космической видеоинформатики. ВРЭ. 2011. Вып. 1. С. 6–31.
80. Цыцулин А. К., Ресовский В. А. Королёвское космическое телевидение // Информация и космос. 2006. № 4. С. 73–79.
81. Цыцулин А. К., Зеленова В. В. Мировые рекорды ленинградского космического телевидения. Труды X Всеросс. Научн. чтений «Научно-технические проблемы в промышленности: будущее сильной России – в высоких технологиях». С. 104–117. См.: <https://yadi.sk/i/oPjYKpr3sBAYS>
82. Зеленова В. В. К Истории НИИ телевидения. ВРЭ. 2015. Вып. 3. С. 4–54.
83. Береговой Г. Т. Угол атаки. М.: Молодая гвардия, 1971. 256 с.
84. Зворыкин В. К., Мортон Д. А. Телевидение. М.: ГИФМЛ. 1956. 780 с.
85. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: ИЛ., 1963. 832 с.
86. Колмогоров А. Н. Теория информации и теория алгоритмов. М.: Наука, 1987. 304 с.

87. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 487 с.
88. Телевизионная камера для малогабаритного звёздного датчика / Иванов В. А., Левко Г. В., Манцветов А. А. и др. // ВРЭ. 2014. Вып. 1. С. 43–51.
89. Обнаружение объектов на звёздном фоне / Левко Г. В., Бобровский А. И., Морозов А. В. и др. // ВРЭ. 2016. Вып. 2. С. 29–38.
90. Цыцулин А. К., Зубакин И. А. Концепция качества информации в теории связи // ВРЭ. 2016. Вып. 4. С. 19–25.
91. Измерение качества информации, формируемой телекамерой / Цыцулин А. К., Зубакин И. А., Левко Г. В. и др. // ВРЭ. 2016. Вып. 4, С. 26–32.
92. Измерение качества видеoinформации на выходе цифрового кодера источника и его эффективности / Зубакин И. А., Ибатуллин С. М., Фахми Ш. С. и др. // ВРЭ. 2016. Вып. 4. С. 33–39.
93. Вычислительная оптика: Справочник. Под ред. М. М. Русинова. М–Л.: Машиностроение, 2008. 423 с.
94. Дубинский Г. П., Кононов В. И., Федоровский А. Ф. Методы оценки качества оптических систем. М.: Машиностроение, 1978. 232 с.
95. Левит А. Б. Введение в общую теорию телевидения. М.: Сов. Радио, 1967. 116 с.
96. Антипин М. В. Интегральная оценка качества телевизионного изображения. Л.: Наука, 1970. 154 с.
97. Кривошеев М. И. Основы телевизионных измерений. М.: Радио и связь, 1989. 608 с. (ранние издания – М.: Связь, 1964. 1976).
98. Хесин А. Я. Автоматический анализ качества телевизионного изображения. Рига: Зинатне, 1969. 164 с.
99. Певзнер Б. М. Качество цветных телевизионных изображений. М.: Радио и связь, 1988. 224 с.
100. Катаев С. И., Хромов Л. И. Об обобщённом критерии оценки качества изображений // Техника кино и телевидения. 1962. № 4. С. 17–18.
101. Хромов Л. И., Ресин В. И. Приложение теории информации к проектированию телевизионных систем // Техника кино и телевидения. 1964. № 3. С. 35–42.
102. Теоретико-информационная характеристика качества изображений при их цифровом сжатии / Куценко С. А., Немцова С. Р., Мкртумов А. С. и др. // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 8 (31). С. 190–202.
103. Шелухин О. И., Иванов Ю. А. Оценка качества передачи потокового видео в телекоммуникационных сетях с помощью программно-аппаратных средств // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2009. Т.5. № 4. С. 48–56.
104. Марков М. В. Сравнительный анализ метрик оценки качества восприятия потокового видео // Сервис в России и за рубежом. 2011. № 1. С. 138–142.

105. Сагдуллаев Ю. С., Ковин С. Д. Информационные аспекты восприятия и анализа разноспектральных изображений // ВРЭ. 2016. Вып. 3. С. 79–85.
106. Кузьмин С. А. Семейство критериев оценки качества, учитывающих свойства зрения. 13 Междунар. конф. «Телевидение: передача и обработка изображений» 29–30 июня 2016 г., Санкт-Петербург. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 136–141.
107. Василенко Г. И., Тараторин А. М. Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986. 304 с.
108. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: в 2 кн. М.: Мир, 1982.
109. Красильников Н. Н. Цифровая обработка 2D и 3D изображений. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 608 с.
110. Зубакин И. А., Козлов В. В., Цыцулин А. К. Методика тестирования видеокодексов с учётом меры нестационарности изображений // Телекоммуникации. 2012. № 8. С. 29–33.
111. Вайнштейн Л. А., Зубаков В. Д. Выделение сигналов на фоне случайных помех. М.: Сов. Радио, 1960. 448 с.
112. Экспериментальная оценка корреляционных функций видео-сюжетов / Левко Г. В., Козлов В. В., Чиркунова А. А. и др. / ВРЭ. 2015. Вып. 5. С. 107–114.
113. Сравнение эффективности кодирования видеосюжетов в телекамере и в цифровом кодере / Левко Г. В., Ибатуллин С. М., Морозов А. В. и др. // ВРЭ. 2016. Вып. 4. С. 29–38.
114. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / Под ред. В. С. Корольока. Киев: Наукова думка, 1978. 584 с.
115. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценивания и модуляции: в 3 т. М.: Радио и связь. Т. 1. 1972. 744 с.; Т.2. 1975. 245 с. Т.3. 1977. 664 с.
116. Космическая оптико-электронная аппаратура обнаружения очагов лесных пожаров/ Мирзоева Л. А., Стариченкова В. Д., Маковцов Г. А. и др. // Оптический журнал. 1992. № 8. С. 17–21.
117. Каталог *WBVR* величин ярких звезд северного неба / Под ред. В. Г. Корнилова // Труды Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга. Т. 63. М.: МГУ, 1991. 400с.
118. Бачевский С. В. Спектральная селекция объектов на фоне звёзд в астрономической телевизионной системе. ВРЭ. 2008. Вып. 2. С. 28–37.
119. Фейнман Р. КЭД – странная теория света и вещества. М.: АСТ, 2014. 191 с.
120. Levesque M.P., Buteau S. Image processing technique for automatic detection of satellite streaks. Defence R&D Canada–Valcartier Technical Report TR 2005-386, February 2007. 42 p.
121. Levesque M.P. Detecnion of artificial satellites in images acquired in track rate mode. Defence R&D Canada–Valcartier Boul. Pie-XI North, Quebec, QC, G3J IX5. 10 p.

122. Лагуткин В. Н. Частотные алгоритмы адаптивной нелинейной фильтрации последовательностей изображений // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. № 5. С. 27–36.
123. Комплекс алгоритмов автоматического обнаружения космических объектов по оптическим изображениям, оценки угловых координат и параметров орбит/ Колесса А. Е., Пругло А. В., Равдин С. С. и др. // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2013. № 4. С. 1–6.
124. Системы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Алпатов Б. А., Бабаян П. В., Балашов О. В. и др. М.: Радиоэлектроника. 2008. 176 с.
125. Киричук В. С., Шакинов А. К. Обнаружение точечных динамических объектов, регистрируемых движущейся камерой // Автотриметрия. 2004. № 1. С. 3–14.
126. Цыцулин А. К., Рудков А. Г., Кулешов В. Н. Способ измерения координат подвижного объекта. А. св. СССР № 1672588, опубл. 23.08.1991.
127. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгстел К. Оптимизация в технике: В 2-х Кн. М.: Мир, 1986. Кн. 1. 350 с., Кн. 2. 320 с.
128. Орбитальная звёздная стереоскопическая обсерватория – фундаментальные и прикладные задачи научной программы, сравнительные оценки проекта/ Чубей М. С., Куприянов В. В., Бахолдин А. В., и др. // Всеросс. Астрометр. конф. «Пулково-2015». СПб. 21–25 сент. 2015 г.
129. Наблюдение искусственных спутников Земли. Портал *BelAstro.Net*
130. Кузьмин С. З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Радио и связь. 1986. 352 с.
131. Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ. Пер. с англ. / Под ред. Б. В. Гнеденко. М.: Физматгиз, 1963. 500 с.
132. Ширяев А. Н. Статистический последовательный анализ. М.: Наука, 1976. 272 с.
133. Бакут П. А., Жулина Ю. В., Иванчук Н. А. Обнаружение движущихся объектов / Под. ред. Бакута П. А. М.: Сов. радио. 1980. 288 с.
134. Трифонов А. П., Шинаков Ю. С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
135. Обнаружение объектов на звёздном фоне / Левко Г. В., Бобровский А. И., Морозов А. В. и др. // ВРЭ. 2016. Вып 2. С. 29–38.
136. Мелешко А. В. Построение цифрового измерителя параметров сигнала на основе синтеза оптимального дискриминатора // ВРЭ. 2011. Вып. 1. с.81–90.
137. Ярлыков М. С., Миронов М. А. Марковская теория оценивания случайных процессов. М.: Радио и связь, 1993. 464 с.
138. Пятков В. В., Мелешко А. В. Способ слежения за объектом и цифровая телевизионная система для его реализации. Патент РФ № 2440691. Опубликовано: 20.01.2012. Бюлл. № 2.

139. Спектральная селекция изображений спутников / Девяткин А. В., Горшанов Д. Л., Левко Г. В. и др. // ВРЭ. 2017. Вып. 1. С. 3–17.
140. Jorgensen K., Culp R. D., Clark R. N. Spectral measurements of returned spacecraft surface and the implications for space debris material measurements. European Space Agency, Provided by the NASA Astrophysics Data System. 2001 ESASP. 473. 385J.
141. Муртазов А. К. Оптические свойства поверхностей ИКО и техногенных отходов в космосе. Околоземная астрономия и проблемы малых тел солнечной системы. М.: Косминформ, 2000. С. 262–268.
142. Багров А. В., Смирнов М. А. Распределение энергии в спектре ИНТ // *Астрономический циркуляр*. № 1327. 1984. С. 7, 8.
143. Багров А. В., Смирнов М. А. Методика фотометрических и спектральных наблюдений ИНТ // *Научные информации Астрономического совета АН СССР*. 1987. Вып. 64. С. 15–20.
144. Диденко А. В. Определение типа геостационарного спутника по данным фотометрических наблюдений // *Новости науки Казахстана*. Алматы. 2002. № 2. С. 17–22.
145. Диденко А. В. Идентификация геостационарных спутников DSP по их орбитальным и фотометрическим характеристикам // *Вестник КазНПУ им. Абая*. Сер. Физ.-мат. науки. № 1(12). 2005. С.76–80.
146. Масуми Ф. Н., Бахтигараев Н. С., Трусов В. П. Фотометрия низкоорбитальных ИСЗ. Околоземная астрономия и проблемы малых тел солнечной системы. М.: Косминформ. 2000. С. 269–275.
147. Миронов А. В. Основы астрофотометрии. М.: МГУ. ГАИШ. 2005. 194 с.
148. Страйжис В. Многоцветная фотометрия звёзд. Вильнюс: Мокслас. 1977. 311 с.
149. Автоматизация комплекса телескопа МТМ-500М / Кулиш А. П., Девяткин А. В., Рафальский В. Б. и др. // *Изв. ГАО*. 2009. № 219. Вып. 1. С. 192–218.
150. Программные пакеты «Апекс-I» и «Апекс-II» для обработки астрономических ПЗС-наблюдений / Девяткин А. В., Горшанов Д. Л., Куприянов В. В. и др. // *Астрономический вестник*. 2010. Т. 44. № 1. С. 74–87.
151. Warner B.D. Initial results from a dedicated H-G project // *Minor Planet Bulletin*, 2007, 34, p. 113–119.
152. Сапар А., Малюто В. // *Публ. Тартуской Астрофиз. Обс.* 1974. Т. XLII. С. 71-93.
153. . Neff et al. Absolute spectrophotometry of Titan, Uranus and Neptune // *Icarus*, 1984, v. 60, pp. 221–235.
154. Свидерскене З. // *Бюлл. Вильнюсской АО*. 1988. № 80.

155. Лабец В. В., Шаталова В. А., Логунов С. В. Алгоритмы классификации звезд по их спектрофотометрической информации // ВРЭ. 2014. Вып. 1. С. 83–93.
156. Адамов Д. Ю. Элементная база оптико-электронных систем с управляемой спектральной чувствительностью // ВРЭ. 2016. Вып. 1. С. 23–30.
157. Landolt A. U. UBVRi photometric standard stars in the magnitude range 11.5–16.0 around the celestial equator // *Astronomical Journal*. 1992. v. 104. p. 340.
158. Спектрофотометрия ярких звёзд / Под ред. И. Н. Глушневой. М.: Наука. 1982. 256 с.
159. Козлов В. В. Принцип итерационного сближения в космическом телевидении // *Информация и космос*. 2012. Вып. 1. С. 105–107.
160. Адаптация космической телевизионной системы к этапам наблюдения объектов / А. А. Манцетов, В. В. Козлов, А. К. Цыцулин и др. // ВРЭ. 2012. Вып. 1. С. 29–43.
161. Синтез прикладных телевизионных систем, адаптивных к динамике сюжета / Умбиталиев А. А., Пятков В. В., Цыцулин А. К. и др. // ВРЭ. 2015. Вып. 3. С. 36–45.
162. Статистический синтез управления телевизионной системой, адаптивной к динамике сюжета / Умбиталиев А. А., Цыцулин А. К., Пятков В. В. и др. // ВРЭ. 2016, Вып. 1. С. 3–11.
163. Видеосистема на кристалле с адаптацией разрядности АЦП / Умбиталиев А. А., Цыцулин А. К., Левко Г. В. и др. // ВРЭ. 2015. Вып. 6. С. 154–156.
164. Репин В. Г., Тартаковский Г. П. Статистический синтез при априорной неопределённости и адаптация информационных систем. М.: Сов. Радио, 1977. 432 с.
165. Умбиталиев А. А. Перспективы развития цифрового телерадиовещания: комплексное решение внедрения цифрового телевидения в регионах // ВРЭ. 2008. Вып. 2. С. 3–8.
166. Цифровое кодирование телевизионных изображений / Цуккерман И. И., Кац Б. М., Лебедев Д. С. и др. Под ред. И. И. Цуккермана. М.: Радио и связь. 1981. 240 с.
167. Красносельский М. А., Покровский А. В. Системы с гистерезисом. М.: Наука, 1983. 271 с.
168. Прохоров Д. М., Семенов М. Е., Канищева О. И. Синтез оптимального управления для одного класса систем с гистерезисными нелинейностями // *Системы управления и информационные технологии*. 2008. № 1.2 (31). С. 256–258.
169. Пятков В. В., Мелешко А. В. Повышение устойчивости работы телевизионных следящих систем при сопровождении объектов с переменной динамикой // ВРЭ. 2008, Вып. 2. С. 58–68.

170. Пятков В.В., Мелешко А.В. Адаптивный следящий измеритель. Патент на изобретение № 2492506. Опубликовано: 10.09.2013. Бюл. № 25.
171. Пятков В.В., Мелешко А.В. Методика анализа динамических ошибок в комбинированных телевизионных следящих системах // ВРЭ. 2010. Вып.1. С. 84–89.
172. Оливер Б. М. Эффективное кодирование / Теория информации и её приложения. Сб. переводов под ред. А. А. Харкевича. М.: ИФ-МЛ, 1959. 328 с.
173. Обработка изображений и цифровая фильтрация. Под ред. Т. Хуанга. М.: Мир, 1979. 320 с.
174. Ричардсон Я. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 – стандарты нового поколения. М.: Техносфера, 2005. 306 с.
175. Витерби А. Д., Омура Дж. К. Принципы цифровой связи и кодирования. М.: 1982. 536 с.
176. Гонсалес Р., Вудс Дж. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
177. Ахмед Н., Рао К.Р. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов. М.: Связь, 1989. 248 с.
178. Цыцулин А. К., Фахми Ш. С., Зубакин И. А. Начальный этап проектирования кодера источника непрерывного сигнала // ВРЭ. 2010. Вып. 2. С. 17–34.
179. Технология *EVC* и микросхема 5022BX014 – комплексный подход к сжатию видео/ Умбиталиев А. А., Шипилов Н. Н, Адамов Д. Ю. и др. // ВРЭ. 2016. Вып. 3. С. 3–13.
180. Способ кодирования и декодирования видеоинформации на основе трёхмерного дискретного косинусного преобразования / Умбиталиев А. А., Шипилов Н. Н., Ибатуллин С. М. и др. Патент РФ № 2375838, опубл. 10.12.2009, БИ №34.
181. Дворников С. С. Спектрально эффективные формы сигналов с непрерывной фазой для передачи дискретной информации // ВРЭ. 2016. Вып. 1. С. 86–93.
182. Framing structure, channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). DVB Document A122, Jun. 2008.
183. Мамчев Г. В. Цифровое телевизионное вещание: Учебное пособие. Новосибирск: СибГУТИ, 2012. 401 с.
184. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: Справочник / под ред. Ю. Б. Зубарева. М.: Горячая линия–Телеком, 2004. 126 с.
185. Анализ эффективности блоковых кодов /Дворников С. В., Устинов А. А., Дворников С. С. и др. // ВРЭ. 2011. Вып. 1. С. 63–73.
186. Месси Дж. Пороговое декодирование / Пер с англ. Под ред. Э. Л. Блоха. М.: Мир, 1966. 208 с.

187. Декодирование самоортогональных кодов / Дворников С. В., Устинов А. А., Погорелов А. А. и др. // ВРЭ. 2012. Вып. 1. С. 93–100.
188. Повышение помехоустойчивости сигналов КАМ-16 с трансформированными созвездиями/ Дворников С. В., Пшеничников А. В., Русин А. А. и др. // ВРЭ. 2014. Вып. 2. С. 51–56.
189. Коржик В. И., Финк Л. М. Расчёт помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: Справ. М.: Радио и связь, 1981. 232 с.
190. Анализ факторов, влияющих на помехоустойчивость сигналов квадратурной амплитудной манипуляции./ Дворников С. В., Устинов А. А., Русин А. А. и др. // ВРЭ. 2014. Вып. 1. С. 3–11.
191. Yen-Ming Chen, Yeong-Luh Ueng «Noncoherent Amplitude/Phase Modulated Transmission Schemes for Releigh Block Fading Channels». IEEE Transaction on communication, vol. 61, № 1, January 2013.
192. Интернет, свободный доступ. <http://www.rfcmd.ru/pub/2699>.
193. J. Mitola III. Cognitive Radio. An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio. – Doctor of Technology Dissertation, Royal Institute of Technology, Sweden, May 2000.
194. Дусматов Д. Х., Назирханов Ж. К. Когнитивное радио – новая беспроводная технология в недалеком будущем. АК ТТЕ № 2(9). 2009. http://www.unicon.uz/www/downloads /analizy_SAEMS1.pdf
195. Построение цифровой системы телевизионной связи с космическими аппаратами на основе малогабаритных земных станций. / Умбиталиев А. А., Кузичкин А. В., Иванов В. А. и др. // ВРЭ. 2013. Вып. 1. С. 1–7.
196. Дворников С. В. Цифровой синтез спектрально-эффективных сигналов телевидения // ВРЭ. 2015. Вып. 6. С. 168–173.
197. Метод адаптивного ортогонального преобразования видеоданных / Дворников С. В., Устинов А. А., Оков И. Н. и др. // ВРЭ. 2016. Вып. 4. С. 85–91.
198. Демодуляция сигналов ОФТ на основе адаптивного порога / Дворников С. В., Устинов А. А., Пшеничников А. В. и др. // ВРЭ. 2013. Вып. 2. С. 90–97.
199. Гуткин Л. С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. М.: Сов.радио, 1985. 368 с.
200. Способ сжатия графических файлов методами вейвлет-преобразований/ Умбиталиев А. А., Дворников С. В., Устинов А. А. и др. // ВРЭ. 2015. Вып 3. С. 100–106.
201. Декодирование самоортогональных кодов / Дворников С. В., Устинов А. А., Погорелов А. А. и др. // ВРЭ. 2012. Вып 1. С. 93–100.
202. Дворников С. В., Устинов А. А., Цветков В. В. Устранение межкадровой избыточности подвижных изображений на основе поиска оптимального базиса преобразования во временной области. ВРЭ. 2012. Вып 2. С. 45–54.

203. Теоретическое обоснование синтеза ансамбля биортогональных сигналов с повышенной помехоустойчивостью/ Дворников С. В., Кузнецов Д. А., Кожевников Д. А. и др. // ВРЭ. 2015. Вып. 5. С. 16–20
204. Теоретические положения трансформации констелляционных диаграмм сигнальных конструкций / Дворников С. В., Погорелов А. А., Пшеничников А. В. и др.// ВРЭ. 2015. Вып. 6. С. 119–126.
205. Дворников С. В., Пшеничников А. В., Русин А. А. Обобщённая функциональная модель радиолинии с управлением её частотным ресурсом // ВРЭ. 2016. Вып. 3. С. 49–56.
206. Предложения по модернизации радиостанций серии Р-168МРАЕ для передачи видео / Дворников С. В., Литкевич Г. Ю., Бортникер В. Ю. и др.// ВРЭ. 2016. Вып. 4. С. 92–99.
207. Синтез многопозиционных сигналов для космического телевидения / Дворников С. В., Семисошенко М. А., Пшеничников А. В. и др.// ВРЭ. 2017, Вып. 1. С. 55–62.
208. Кукк К. И. Спутниковая связь: прошлое, настоящее, будущее. М.: Горячая линия – телеком. 2015. 256 с.
209. Дзитоёв А. М., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Тепловые режимы космических объектов: монография / под ред. М. М. Пенькова. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского. 2016. 172 с.
210. Гецелёв И. В., Зубарев А. И., Пудовкин О. Л. Радиационная обстановка на борту космических аппаратов. М.: ЦИПК. 2001. 316 с.
211. Моделирование воздействия микрометеоритов и фрагментов космического мусора на космические аппараты / А. А. Воробьев, Т. С. Зыкова, Д. Д. Спицын и др. // Вопр. электромеханики. 2011. Т. 120. С. 27–30.
212. Природа электростатических разрядов на внешней поверхности космических аппаратов / А. Н. Дорофеев, А. П. Тютнев, В. С. Саенко и др. // Физика и химия обработки материалов. 2004. № 5. С. 32–37.
213. Тимошенко В. П., Адамов Ю. Ф. Надёжность электроники космических аппаратов при воздействии ионизирующих излучений. М.: МИЭТ. 2015. 124 с.
214. Новиков Л. С. Взаимодействие космических аппаратов с окружающей плазмой: учеб. пособие. М.: Университетская кн., 2006. 120 с.
215. Космические лучи и естественный радиационный фон у поверхности Земли/ Бирюков А. А., Крутов А. Ф., Пузырный А. Г. и др. Самара: Изд-во Самарского университета, 2012. 118 с.
216. Арбузов В. И. Основы радиационного оптического материаловедения. СПб.: СПбГУИТМО. 2008. 284 с.
217. Обработка видеосигнала астродатчика для подавления радиационных дефектов / Левко Г. В., Манцветов А. А., Адамов Д. Ю. и др. // ВРЭ. 2014. Вып. 2. С. 24–32.

218. Радиационнотойкий КМОП фотоприёмник формата 1024×1024 / Умбиталиев А. А., Пятков В. В., Адамов Д. Ю. и др. // ВРЭ. 2016. Вып. 4. С. 4–10.

219. Zhang M., Bermak A. CMOS Image Sensor with On-Chip Image Compression: A Review and Performance Analysis // J. of Sensors. 2010. Vol. 2010. P. 1–17.

220. Березин В. В., Фахми Ш. С., Цыцулин А. К. Начальный этап проектирования видеосистем на кристалле // Опт. журн. 2012. № 11. С. 76–83.

221. <https://ria.ru/space/20160218/1376813806.html>;
<http://novosti-kosmonavtiki.ru/forum/forum11/topic14928/> бийон

222. Тренажерные комплексы и тренажеры. Технологии разработки и опыт эксплуатации / В. Е. Шукшунов, В. В. Циблиев, С. И. Потоцкий и др. Под ред. В. Е. Шукшунова. М.: Машиностроение, 2005. 394с.

223. Наумов Б. А., Хрипунов В. П., Пугилин Д. В. К вопросу о рациональной структуре комплекса технических средств подготовки космонавтов / ВРЭ. 2015. Вып. 6. С. 166–168.

224. <http://gctc.ru>

225. Тренажерные комплексы / Брагин В. И., Долговесов Б. С., Городилов М. А. и др. // Пилотируемые полеты в космос. Материалы XI Междунар. НПК 10–12 ноября 2015 года. Звёздный городок: ФГБУ «Научно-иссл. Испыт. Центр подг. космонавтов им. Ю. А. Гагарина» С. 247–248.

226. Цифровой комплекс коммутации и распределения телевизионной информации космодрома «Восточный»/ Умбиталиев А. А., Кузичкин А. В., Аганов А. Ю. и др. // ВРЭ. 2015. Вып. 2. С. 13–20.

227. Система приёма и трансляции видеoinформации с площадок космодрома/ Умбиталиев А. А., Кузичкин А.В., Севастьянов Д.А. и др.// ВРЭ. 2014. Вып.2. С.57–61.

228. Передвижная телевизионная станция класса *Driveaway* по стандарту телевидения высокой чёткости *HD-SDI* для космодрома «Восточный»/ Кузичкин А. В., Баланин Л. Н., Жуков Л. И. и др.// ВРЭ. 2015. Вып. 3. С. 117–123.

229. Программное обеспечение рабочего места оператора центра коммутации и распределения телевизионной информации / Ляпидевский А. В., Гололобов В. И., Захаров А. В. и др.// ВРЭ. 2015. Вып. 2. С. 21–27.

230. Организация обмена телевизионной информацией на космодроме «Восточный» при обеспечении первого пуска / Умбиталиев А. А., Кузичкин А. В., Севастьянов Д. А. и др. // ВРЭ. 2016. Вып. 4. С. 11–18.

231. Дойч Д. Начало бесконечности: объяснения, которые меняют мир. М.: Альпина нон-фикшн. 2014. 581 с.

232. Уотсон Р. Будущее. 50 идей, о которых нужно знать. М.: Фантом Пресс. 2015. 208 с.

233. <http://www.roscosmos.ru/22347>

234. <https://ria.ru/science/20160115/1360152986.html>; <http://www.kosmos4you.ru/tekhnika/pilotiruemyj-transportnyj-korabl-federaciya.html>
235. Фахми Ш. С., Бобровский А. И., Алексеенко Я. В. Реализация параллельной обработки видеoinформации на основе пространственно-рекурсивного метода // ВРЭ. 2015. Вып. 4. С. 89–97.
236. Луцив В. Р. Сверточные искусственные нейронные сети глубокого обучения // Оптический журнал. 2015. №8. С. 11–23.
237. Галимов Э. М. Замыслы и просчеты: Фундаментальные космические исследования в России последнего двадцатилетия. Двадцать лет бесплодных усилий. М.: Едиториал УРСС. 2010. 304 с.
238. <https://rg.ru/2014/12/30/doktrina-dok.html>
239. Анализ количества темновых электронов твердотельных фотоприёмников при высокой рабочей температуре / Стрижнев К. В., Белоус Д. А., Баранов П. С. и др. // ВРЭ. 2017. Вып. 2. С. 31–40.
240. https://www.youtube.com/watch?v=T_N25YzV1EQ
241. Баранов П. С. Статистический метод устранения разброса параметров выходных устройств фотоприёмника. ВРЭ. 2013. Вып. 2. С. 80–89.
242. Иванов В. Г., Каменев А. А. Направления развития технологий многоспектральных оптико-электронных средств малых КА. ВРЭ. 2016. Вып. 4. С. 3–8.
243. Иванов В. Г., Каменев А. А. Направления развития технологий создания многоспектральных оптико-электронных средств малых низкоорбитальных КА для наблюдения за объектами РКТ. ВРЭ. 2017. Вып. 2. С. 79–84.
244. Межпланетная солнечная стереоскопическая обсерватория / Григорьев В. М., Папушев П. Г., Чубей М. С. и др. // Оптический журнал. 2006. № 4. С. 43–48.
245. Проект «Орбитальная Звездная Стереоскопическая Обсерватория». Фундаментальные и прикладные аспекты решения задач астероидно-кометной безопасности/ М. С. Чубей, С. В. Маркелов, Г. В. Левко и др.// М-нар. Конф. «Околоземная астрономия-2015», Терскол, 31.08–5.09 2015.
246. Умбиталиев А. А. Пятков В. В., Цыцулин А. К. Устройство формирования видеосигнала от КМОП-матрицы. Патент РФ № 2478241 от 27.03 2013. Оpubл. БИ № 9.
247. Адамов Д. Ю., Сомов О. А. Методы управления и пересчёта спектральной чувствительностью вертикально-совмещенных фотоприёмных структур. ВРЭ. 2017. Вып. 1. С. 18–22.
248. Видеосистема на кристалле с адаптацией к сюжету / Цыцулин А. К., Левко Г. В., Адамов Д. Ю. Патент РФ № 2612191 от 03.03.2017. Оpubл. БИ № 7.

249. Видеосистема на кристалле (варианты) / Цыцулин А. К., Левко Г. В., Адамов Д. Ю. и др.// Патент РФ № 2581423 от 20.04. 2016. Оpubл. БИ №11.

250. Способ формирования различных полей зрения / Умбита-лиев А. А., Цыцулин А. К. Шипилов Н. Н. и др. Патент РФ № 2505844 от 10.10.20132. Оpubл. БИ № 3.

251. Видеомодуль для работы в открытом космосе / Письменный Е.В., Эфендиева Л.А., Гультяев Ю.П. и др. Патент РФ № 147006 от 27.10.2014. Оpubл. БИ № 30.

252. САПР АВОКАД для проектирования КМОП фотоприёмников и аналого-цифровых интегральных схем / В. В. Аблогин, Д. Ю. Адамов, В. А. Зимогляд и др. // ВРЭ. 2010. Вып. 2, С. 83 – 92.

253. <http://dssp.petsru.ru/p/tutorial/informatics/chapter1/3/32.htm>

254. Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Карелов А. И. Интеграция командных приборов как путь оптимизации системы управления космического аппарата // Космическое приборостроение. Координатно-временные системы с использованием космических технологий. Сб. трудов семинара, Таруса 7–9 июня 2006. М.: ИКИ РАН. 2007. С. 43–54.

255. Моделирование систем полуавтоматического управления космических кораблей / Береговой Г. Т., Яковлев А. И., Василец В. М. и др. М.: Машиностроение, 1986. 280.

256. <http://russianspacesystems.ru/2016/07/18/novaya-razrabotka-rks-svyazhet-dalniy-k>

257. <https://habrahabr.ru/post/153555/>

258. <http://rossaprimavera.ru/news/na-mks-budet-ispytana-ruka-manipulyator>

259. <https://3dnews.ru/942586>

260. Особенности архитектуры телевизионной системы космического робота-манипулятора/ Левко Г. В., Иванов К. В., Кондратьев А. С., и др.// ВРЭ. 2016. Вып. 1. С. 48–60.

261. Гареев Г. З., Лучинин В. В. Терагерцовые системы и технологии. СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 228 с.

262. Дёмин А. В., Денисов А.В., Летуновский А.В. Оптико-цифровые системы космического назначения // Известия высших учебных заведений «Приборостроение». 2010. № 3. С. 51–59.

263. Горбачев В. А., Веснин К. В., Климов А. В. Метеорологические приемные комплексы // ВРЭ. 2017. Вып. 3. С. 3–11.

264. Шкловский И. С. Вселенная, жизнь, разум. М.: Наука, 1987. 320 с.

265. <https://www.spbdnevnik.ru/news/2017-05-22/roskosmos--nachal-sozdaniy-tsifrovoy-modeli-zemli/> ;
<http://russianspacesystems.ru/2017/05/22/proekt-cifrovaya-zemlya-stimuliruet/>

Оглавление

Предисловие.....	3
От авторов	6
Введение.....	9
Глава 1. Методология космического телевидения	25
1.1. Философия космического телевидения.....	25
1.2. История вниитовского космического телевидения – философия в примерах.....	39
Глава 2. Теория космического телевидения.....	61
2.1. Статистический анализ и синтез. Цели и методы статистического синтеза	61
2.2. Совместное различение сигналов и оценивание их параметров	99
2.3. Кодирование источника.....	131
2.4. Адаптация телевизионной системы при сопровождении объектов.....	153
2.5. Кодирование канала	179
Глава 3. Практика космического телевидения.....	224
3.1. Специфика космического телевидения	224
3.2. Космические ТВ камеры.....	237
3.3. Кодеры видеоинформации, формируемой системами космического телевидения	249
3.4. Контроль сближения КА.....	263
3.5. Телевизионная система биоспутника БИОН-М	280
3.6. Телевизионная система скафандра Орлан-2	284
3.7. Метеорологические приёмные комплексы	287
3.8. Тренажёрные комплексы для космонавтов.....	293
3.9. Развитие телевизионной инфраструктуры космодромов ...	297
Глава 4. Перспективы космического телевидения.....	320
4.1. Тенденции развития отечественной космонавтики.....	321
4.2. Тенденции развития космического телевидения.....	326
4.3. Основные направления технологического развития космического телевидения	330
4.4. Примеры перспективных проектов.....	344
Заключение.....	348
Литература	351

Научное издание

Умбиталиев Александр Ахатович
Цыцулин Александр Константинович
Левко Геннадий Владимирович
Пятков Вячеслав Викторович
Кузичкин Александр Васильевич
Дворников Сергей Викторович
Шипилов Николай Николаевич
Манцветов Андрей Александрович
Адамов Денис Юрьевич
Бобровский Алексей Иванович
Козлов Всеволод Витальевич
Богданов Юрий Германович
Царелунго Анатолий Борисович
Ибатуллин Салих Мансурович
Иванов Кирилл Викторович
Зеленова Вера Васильевна

Теория и практика космического телевидения

Редактор Долгова Л. П.

Подписано в печать 01.06.2017 г. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman». Печ. л. 23,0
Тираж 300. Заказ

Отпечатано с готового оригинал-макета
В типографии издательства СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5



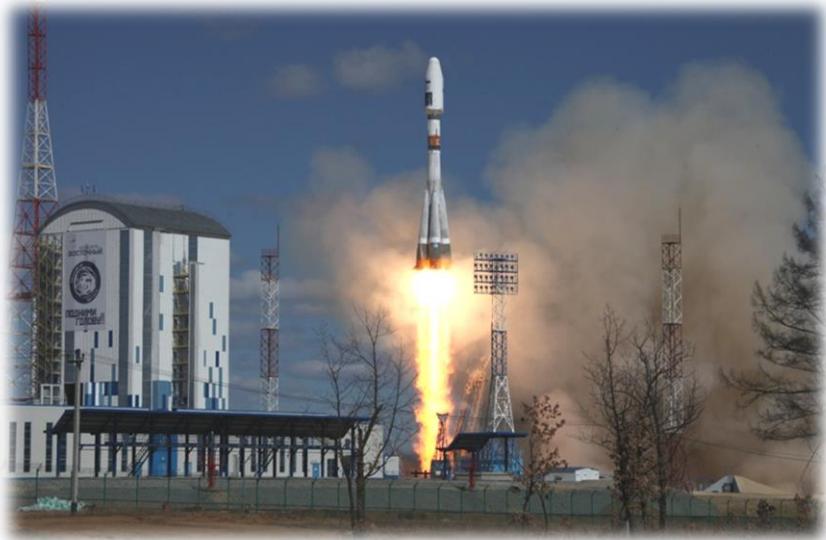
В нижнем ряду А. С. Елисеев А. Г. Николаев, П. Ф. Брацлавец, В. В. Горбатко



В нижнем ряду в центре В. Ф. Крылков, Г. Т. Береговой, П. Ф. Брацлавец

Публика акцентирует внимание на исполнителях главных ролей. Но нам, космонавтам, имена тех, кто обеспечивает надёжность космического рейса, бесконечно дороги и близки. Доля их ответственности неизмеримо больше тех почестей, которые мы им пока в силах оказать.

Г. Т. Береговой



Первый пуск ракеты-носителя «Союз-2.1а»
с космодрома «Восточный» 28 апреля 2016 г.



Выступление Президента Российской Федерации В. В. Путина
после первого пуска ракеты-носителя
с космодрома «Восточный» 28 апреля 2016 г.



**Ракета, запущенная в космос
без радиотелевизионной аппаратуры,
подобна камню,
брошенному из средневековой пращи**

С. П. Королёв