

На правах рукописи

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Kozlov', followed by a small Roman numeral 'I'.

КОЗЛОВ ВСЕВОЛОД ВИТАЛЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ
КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ**

Специальность 05.12.04

Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2012

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова-Ленина

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Цыцулин Александр Константинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Бачевский Сергей Викторович
Санкт-Петербургский Государственный
Университет телекоммуникаций
им. М. А. Бонч-Бруевича, ректор

кандидат технических наук
Сушев Геннадий Алексеевич
Научно-проектный центр оптоэлектронных
комплексов наблюдения (филиал ОАО
корпорация «Комета»), ведущий научный
сотрудник

Ведущая организация: ОАО «Центральный научно-исследовательский
институт «Электрон»

Защита состоится «_____» _____ 2012 г. на заседании диссертационного
совета Д 212.238.03 Санкт-Петербургского государственного
электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по
адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «_____» _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

д.т.н., профессор С. А. Баруздин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена решению части крупной научно-технической проблемы повышения помехоустойчивости и информационного согласования с сюжетом видеоинформационных систем реального времени, состоящей в решении задач разработки методов повышения помехоустойчивости измерительных систем космического телевидения. При этом рассматривается широкий класс помех – ошибки пространственно-временной дискретизации изображений, фоновые и шумовые помехи, а повышение помехоустойчивости характеризуется уменьшением дисперсий ошибок измерения параметров наблюдаемых объектов. В диссертации делается акцент на адаптацию параметров разложения изображения в условиях априорной неопределённости о фоно-целевой обстановке и изменяющейся в процессе наблюдения дальности до объектов, в роли которых в первую очередь выступают космические аппараты (КА).

Актуальность темы. Задача повышения помехоустойчивости измерительных систем космического телевидения актуальна при построении систем контроля сближения и стыковки с кооперируемыми КА, в том числе с Международной космической станцией (МКС), а также систем контроля автономного движения и ориентации КА. Целевой аспект данной диссертации определяется Федеральной космической программой России на 2006–2015 гг. (с изменениями от марта 2011 г.), предусматривающей большие бюджетные вложения во все отрасли космонавтики, в том числе в системы пилотируемой космонавтики, конкретно нацеливая разработчиков космической техники на *«создание научно-технического задела и обработку ключевых элементов перспективных средств реализации пилотируемых программ»*. Эти средства включают телевизионное оборудование для наблюдения внутри космических кораблей и вне их, передачу телевизионных сигналов между космическими аппаратами, с них на Землю и с Земли на них. Технический и технологический аспекты решаемой задачи повышения помехоустойчивости космических телевизионных систем находятся в русле общей проблемы развития оптико-электронных и телевизионных систем, предусматриваемого программой «Национальная технологическая база» на период 2013–2016 годы.

Рассматриваемый класс измерительных телевизионных систем реального времени предназначен для обеспечения контроля ориентации, сближения и стыковки КА и решает задачу формирования оценок параметров наблюдаемых объектов (в первую очередь – КА) с малыми задержками, позволяющими минимизировать время принятия решений и реализации управления КА. Эти операции, согласно выдвинутому С. П. Королёвым принципу итерационного сближения КА, реализуются в интерактивном режиме с помощью телевизионных, оптических и оптико-электронных средств, широко освещённых в литературе (П. Ф. Брацлавец, И. А. Росселевич, Л. И. Хромов, А. Н. Изнар, А. В. Павлов, Б. Ф. Фёдоров,

Я. М. Ивандиков, С. Д. Сильвестров, В. В. Васильев, Г. П. Катис, Ю. С. Сагдуллаев, С. В. Бачевский).

Основой для повышения помехоустойчивости измерительных систем космического телевидения, является их адаптация. Ключевым моментом для их создания была концепция малокадрового телевидения С. И. Катаева, в результате применения которой в космической технике (П. Ф. Брацлавец, И. А. Росселевич, Л. И. Хромов, Ю. К. Ходарев, Ю. Б. Зубарев, А. С. Селиванов, Г. А. Аванесов) часто космическое телевидение и малокадровое телевидение считаются синонимами. Вместе с тем смысловым ядром малокадрового телевидения является не медленность передачи, а адаптация параметров разложения к свойствам сюжета. В связи с развитием твердотельного телевидения адаптация параметров телевизионных систем стала реальностью. Вооружённое теорией адаптивных радиотехнических систем (Р. Л. Стратонович, В. Г. Репин, Г. П. Тартаковский, В. И. Тихонов, Б. Р. Левин), твердотельное телевидение, во многом технологически и методологически сливаясь с компьютерной техникой, освоило широкий ряд адаптивных методов приёма оптических сигналов и передачи изображений по каналам связи (Л. И. Хромов, Н. В. Лебедев, А. Н. Куликов, А. А. Умбиталиев, А. К. Цыцулин).

Данная работа является применением и развитием этих результатов.

Предмет исследования. Рассматриваемый класс систем реального времени на матричных фотоприёмниках включает активные и пассивные системы, работающие как в автоматическом, так и в интерактивном режиме. Помехоустойчивость ниже рассматривается с учётом концепций счёта фотонов А. Роуза и потенциальной помехоустойчивости В. А. Котельникова, ведущих к определению помехоустойчивости, ограничиваемой совокупным влиянием фотонного шума и шума считывания изображения с твердотельной матрицы. Трудность достижения предельной помехоустойчивости связана с широким диапазоном изменения параметров фоно-целевой обстановки, включающих изменение в широких пределах как от сеанса к сеансу, так и в пределах одного сеанса, условий освещения и дальности до наблюдаемых объектов.

Анализ состояния отечественных и зарубежных разработок измерительных систем космического телевидения показывает, что в пассивных и активных системах используются различные способы адаптации, и в большинстве случаев используется два основных типа. Первый тип, использованный в самой первой космической аппаратуре «Енисей» при передаче изображения обратной стороны Луны – использование нескольких объективов с различными фокусными расстояниями. Второй тип, широко используемый как в космосе, так и во всех наземных системах – регулировка времени накопления в твердотельном фотоприёмнике при постоянной кадровой частоте и постоянной чёткости. Таким образом, измерительные системы космического телевидения должны быть адаптивными к ряду параметров наблюдаемых объектов.

Целью диссертационной работы является решение задачи повышения помехоустойчивости измерительных систем космического телевидения, работающих в реальном времени, путём оптимизации режимов их работы.

Для решения охарактеризованной задачи необходимо проанализировать особенности наблюдаемых сюжетов и разработать методы повышения помехоустойчивости, учитывающие специфику преобразования сигналов в матричных фотоприёмниках. Такие методы должны явиться следствием решения задач:

1. Повышения помехоустойчивости телевизионных систем контроля сближения КА путём оптимального согласования параметров накопления и считывания изображения с дальностью до наблюдаемых объектов.

2. Повышения помехоустойчивости контроля стыковки КА с помощью системы пассивных и активных реперов.

3. Повышения помехоустойчивости совмещения изображений подстилающей поверхности и линии горизонта.

4. Тестирования (оценки помехоустойчивости) измерительных систем космического телевидения путём согласования параметров телекамер и кодеров изображений с возможным диапазоном изменения масштаба изображения объекта.

Основные методы исследования. На пути решения поставленной задачи имеются трудности, разрешаемые различными методами, подразделяемыми на три группы: теоретические (методы теории обнаружения и оценивания, теории информации), компьютерного моделирования и экспериментальной оценки помехоустойчивости.

Научная новизна. Основным научным результатом является разработка метода адаптации параметров разложения телевизионной системы контроля сближения КА, являющегося развитием принципа итерационного сближения КА, сформулированного в 1962 г. С.П. Королёвым, и состоящего во взаимообмене кадровой частоты и чёткости по мере изменения дальности до объекта. Эта формализация включает новые формулы для оптимального числа пикселей и кадровой частоты, полученные для разных моделей сигнала: для случайного коррелированного по пространству и времени поля и для движущегося объекта на оцениваемой дальности, а также правило адаптации параметров разложения на основе равенства дисперсий межкадровых и межэлементных разностей.

Частные результаты:

- Метод формирования и размещения специальных реперов на кооперируемых КА для повышения помехоустойчивости обнаружения и измерения параметров ориентации кооперируемых КА.

- Метод комплексирования системы наблюдения поверхности Земли с датчиком горизонта, позволяющий повысить точность привязки наблюдаемого изображения к подспутниковой точке благодаря исключению ошибок юстировки этих подсистем и неточностей их временной синхронизации.

- Метод предполётного тестирования и регулирования измерительных систем космического телевидения в части параметров накопления и обработки сигналов в телекамерах и кодерах сжатия видеoinформации.

Практическая значимость полученных результатов определяется выигрышами, достигнутыми в помехоустойчивости измерительных систем космического телевидения при использовании разработанных методов, в том числе:

1. Разработан метод адаптации параметров разложения к дальности до КА путём взаимобмена чёткости и кадровой частоты изображения, позволяющий на порядок расширить диапазон дальностей, в которых ошибка измерения промаха не превышает допустимого значения.

2. Разработан метод создания системы пассивных и активных реперов, позволяющий в 2...4 раза повысить точность измерения параметров дальности и ориентации КА.

3. Разработан метод повышения помехоустойчивости совмещения изображений подстилающей поверхности и линии горизонта путём их проекции на один матричный фотоприёмник, позволяющий исключить инструментальные ошибки.

4. Разработаны методики тестирования телекамер контроля стыковки КА и кодеров сжатия изображений для передачи цифрового телевизионного сигнала по радиоканалам борт–борт и борт–Земля, обеспечивающие надёжное функционирование аппаратуры в широком диапазоне параметров фоно-целевой обстановки.

Положения, выносимые на защиту:

1. Для повышения помехоустойчивости измерения параметров КА следует использовать адаптацию телевизионной системы к этапам сближения в виде обмена высокой чёткости на большой дальности на высокую кадровую частоту при малой дальности на основе правила равенства дисперсий межкадровых и межэлементных разностей.

2. Для повышения помехоустойчивости измерения параметров КА следует использовать систему трёхмерных пассивных и активных реперов с переменными параметрами, зависящими от дальности.

3. Для устранения инструментальных ошибок пространственного и временного согласования телевизионной системы наблюдения Земли с датчиком горизонта следует применить их комплексирование в рамках единой оптической схемы с одним матричным фотоприёмником.

4. Для обеспечения контроля стыковки КА в широком диапазоне изменения фоно-целевой обстановки необходимо тестирование телекамер и кодеров сжатия телевизионного сигнала на основе предложенных компактных представительных выборок сюжетов.

Реализация результатов работы. Разработанные методы нашли применение в ряде ОКР:

- Разработка предложений по конструкции и технической реализации телевизионной системы перспективной пилотируемой транспортной системы (СЧ ОКР «Перспектива», ОАО «НИИТ»).

- Разработка технических предложений на создание телевизионной аппаратуры системы технического зрения для мониторинга и определения параметров относительного движения космических объектов» (СЧ ОКР «СТЗ-ТА», ОАО «НИИТ»).

- РКК «Энергия» (испытания телевизионных комплексов КЛ-100-01М, КЛ-100-19М кораблей «Союз» и «Прогресс»);

- Разработка технических предложений на создание телевизионной аппаратуры системы технического зрения для мониторинга и определения параметров относительного движения космических объектов» (ОКР «СТЗ-ТА», ФГУП «ЦНИИ РТК»).

Апробация работы. Отдельные вопросы были обсуждены на конференциях:

- «Транспорт России: проблемы и перспективы» (2011, СПб, ИПТ РАН).

- «Радиолокация, навигация, связь» (2012, СПб, ГУАП);

- «Оптико-электронные устройства распознавания образов, обработка изображений и символической информации» (2012, Курск КТУ).

- «Телевидение. Передача и обработка изображений» (2012, СПб, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

- СПб отделения НТО РЭС им. А. С. Попова (2012, СПб, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

Диссертация в целом обсуждена на научно-техническом семинаре в ОАО «Научно-исследовательский институт телевидения» (ОАО «НИИТ»), Санкт-Петербург.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 20 научных работ, из них 7 статей в журналах из перечня ВАК и 9 докладов на научно-технических конференциях; получен 1 патент на полезную модель, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, 2 заявки на выдачу патента.

Структура и объём. Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, список литературы, включающий 124 наименования. Основная часть работы изложена на 118 страницах. Общий объём работы 165 стр., включая 36 стр. рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, указана цель работы, определены задачи и методы исследования. Сформулированы научная новизна, практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту.

Глава I посвящена анализу методов построения и состояния разработок систем космического телевидения. Отмечается потребность в телевизионных системах для космических исследований и для обеспечения ориентации КА, общесистемный взгляд на космическое телевидение, а также их методологическое и технологическое родство с другими нештатными измерительными системами. Характеризуется концепция адаптивных систем, возможности твердотельных систем по перестройке параметров и приложение концепции адаптации к видеоинформационным системам. Отмечается важная роль обработки изображений для оценки параметров

объектов и кодирования видеосигнала для передачи по радиоканалам типов борт–борт и борт–Земля. Задача повышения помехоустойчивости сформулирована как задача определения оптимальных параметров твердотельной телевизионной системы в условиях априорной неопределённости о параметрах наблюдаемого объекта. На основе приведенного анализа формулируются задачи исследования.

Глава II посвящена приложению принципов достижения потенциальной помехоустойчивости и принципа адаптации к измерительным космическим системам и обоснованию необходимости перехода от регулярной пространственно-временной дискретизации к адаптивной дискретизации в матричном фотоприёмнике. Рассмотрены два класса измерительных систем космического телевидения: контроля сближения и стыковки космических аппаратов и комплексирования систем наблюдения подстилающей поверхности и ориентации КА по линии горизонта.

Для первого класса систем показано, что для реализации принципа итерационного сближения КА необходима адаптация ряда параметров:

- фокусного расстояния объектива,
- числа элементов разложения фотоприёмника,
- времени кадра,
- алгоритма и коэффициента сжатия изображения в кодере.

Для определения алгоритмов адаптации параметров разложения изображения фотоприёмной матрицей на N^2 пикселей при времени кадра T_k следует учесть ограничение скорости $C \leq C_0$ считывания изображения, которая оценивается по полосе частот видеосигнала в соответствии с теоремой отсчётов В. А. Котельникова:

$$C = N^2 / 2T_k. \quad (1)$$

Критерий качества изображения может быть назначен в виде минимума ошибки измерения параметров изображения объекта и записан в виде:

$$\varepsilon = \min_{N, T} \quad \text{при} \quad C = N^2 / 2T_k \leq C_0. \quad (2)$$

Требуемый минимум при заданном ограничении относит задачу (2) к изопериметрическим. Формализация взаимосвязи накопления по полю и по времени возможна при моделировании сигналов как случайными полями, так и неслучайными движущимися объектами с неизвестными пространственно-временными параметрами. Моделирование сигналов случайными полями в задаче контроля сближения КА является некоторым упрощением постановки задачи в смысле отказа от формализации зависимости изменения межкадровых и межэлементных приращений сигнала при изменении координат, масштаба и ориентации КА. Это не изменяет сути параметрического синтеза телевизионной системы, ведя лишь к некоторому терминологическому изменению: в этой постановке речь идёт не о статической или динамической ошибке определения координат КА, а о составляющих ошибки передачи сигнала по разным аргументам.

При моделировании изображений случайными процессами традиционно

считают известными (оцененными) автокорреляционные функции по полю $K_x(x) = K_y(y)$ (изотропное изображение) и по времени $K_t(t)$. Дисперсии приращений сигнала на интервалах пиксела $D_{\Delta x}$ и кадра $D_{\Delta t}$ составляют:

$$D_{\Delta x} = 2K_x(0)[1 - K_x(\Delta x)/K_x(0)]; \quad D_{\Delta t} = 2K_t(0)[1 - K_t(\Delta t)/K_t(0)]. \quad (3)$$

Приняв модель случайного сигнала с экспоненциальными автокорреляционными функциями $K(x) = K_x(0)\exp(-|x|/\tau_x)$ и $K(t) = K_t(0)\exp(-|t|/\tau_t)$ с интервалами корреляции по полю τ_x и по времени τ_t при не слишком больших интервалах дискретизации из формулы (3) можно найти дисперсию ошибки передачи, связанную с пространственно-временной дискретизацией:

$$\varepsilon = 2D_{\Delta x} + D_{\Delta t} = 4K_x(0)\Delta x/\tau_x + 2K_t(0)\Delta t/\tau_t. \quad (4)$$

Взяв производную от суммарной ошибки (4) по числу N пикселей в строке (линейный размер пиксела определяется линейным размером l фотоприёмной матрицы: $\Delta x = l/N$) $d\varepsilon/dN$ и приравняв её нулю, найдём оптимальные значения полного числа пикселей N^2 и (с учётом (1)) времени кадра T_k :

$$N_{\text{опт}}^2 = \left(2lC_0 \frac{K_x(0)\tau_t}{K_t(0)\tau_x} \right)^{2/3}, \quad T_{k\text{опт}} = \frac{1}{(2C_0)^{1/3}} \left(l \frac{K_x(0)\tau_t}{K_t(0)\tau_x} \right)^{2/3} \quad (5)$$

Для использования полученных формул на практике необходим алгоритм формирования управляющих сигналов для управления пространственно-временной дискретизацией. Он формализуется подстановкой выражений для дисперсий ошибок дискретизации по полю и повремени из (4) в формулы (5), что даёт *правило адаптации параметров разложения* прикладных телевизионных систем:

$$D_{\Delta x} = D_{\Delta t}. \quad (6)$$

При моделировании телевизионных сигналов КА не случайными полями, а сигналами известной формы с параметрической неопределённостью о размерах, сдвиге и ориентации, так же используется критерий (2) с тем лишь терминологическим уточнением, что минимизируемая ошибка имеет две составляющие: статическую и динамическую.

Статическая ошибка при существенных ограничениях на пропускную способность канала связи связана в первую очередь с размером пиксела $\Delta x = l/N$. Для независимых ошибок измерения координат объекта в вертикальном и горизонтальном направлениях дисперсия статической ошибки вдвое больше квадрата линейного размера пиксела:

$$\varepsilon_{\text{ст}} = 2l^2/N^2. \quad (7)$$

Динамическая ошибка обратно пропорциональна дальности L до наблюдаемого КА и пропорциональна времени кадра T_k и модулю вектора скорости v наблюдаемого объекта. Совокупное влияние вклада радиальной и тангенциальной скорости движения наблюдаемого КА оценивается по площади разностного сигнала изображения КА в соседних кадрах. Дисперсия динамической ошибки составляет:

$$\varepsilon_{\text{дин}} = v^2 T_k^2 f^2 / L^2. \quad (8)$$

Тем же методом подстановки компонент (7), (8) ошибок в критерий (2), взятия производной $d\varepsilon/dT_k$ и приравнивания её нулю с учётом (1) определяются оптимальные параметры разложения для неслучайной модели сигнала:

$$T_{\text{конт}} = \frac{1}{(2C_0)^{1/3}} \left(\frac{lL}{vf} \right)^{2/3}, \quad N_{\text{опт}}^2 = \left(\frac{2C_0 lL}{vf} \right)^{2/3}. \quad (9)$$

Структура полученных для случайной и неслучайной модели сигнала формул (5) и (9) показывает их большое сходство, обусловленное единством критерия (2). Они показывают, что пространственная и временная дискретизация в оптимальной телевизионной системе взаимосвязаны и не могут определяться независимо. Эти формулы предписывают адаптацию параметров разложения к динамике сюжета и дальности до наблюдаемого КА. Они диктуют новый подход к синтезу телевизионной системы контроля сближения КА, отличающийся от ранее принятого, когда требования к разрешающей способности телекамеры по полю и по времени (чёткости и кадровой частоте) задавались компромиссно для всего сеанса наблюдения. Новый подход позволяет с помощью формул (5), (6) и (9) распространить на проектирование телекамер итерационный принцип контроля сближения КА, выдвинутый С. П. Королёвым. При этом может быть сделан акцент как на адаптации к этапам контроля сближения и стыковки КА, так и на адаптации к изменениям свойств наблюдаемого сюжета. В первом случае главным оцениваемым параметром становится дальность до КА, оцениваемая по его видимому размеру a при известном габарите A : $L = Af/a$ (рис. 1).

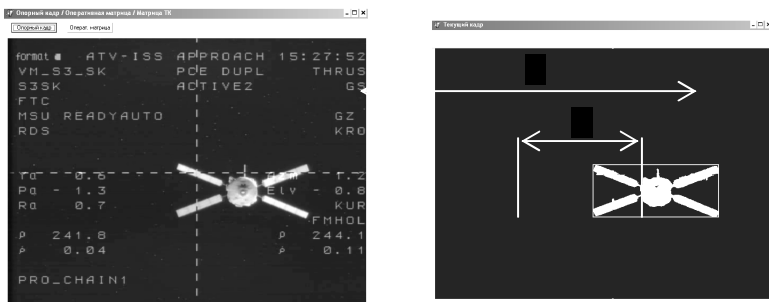


Рис. 1 Оценивание дальности по видимым размерам КА

Во втором случае баланс статических и динамических ошибок в соответствии с правилом (6) оценивается по соотношению средних значений межэлементных и межкадровых разностей (рис. 2). В обоих случаях структурная схема адаптивной телевизионной системы содержит блок измерения параметров сигнала изображения.

Адаптивная телевизионная система (рис. 3) должна на разных этапах сближения КА, т.е. на разных дальностях, перестраивать чёткость и кадровую частоту телекамеры так, чтобы частота передачи пикселей в кодер

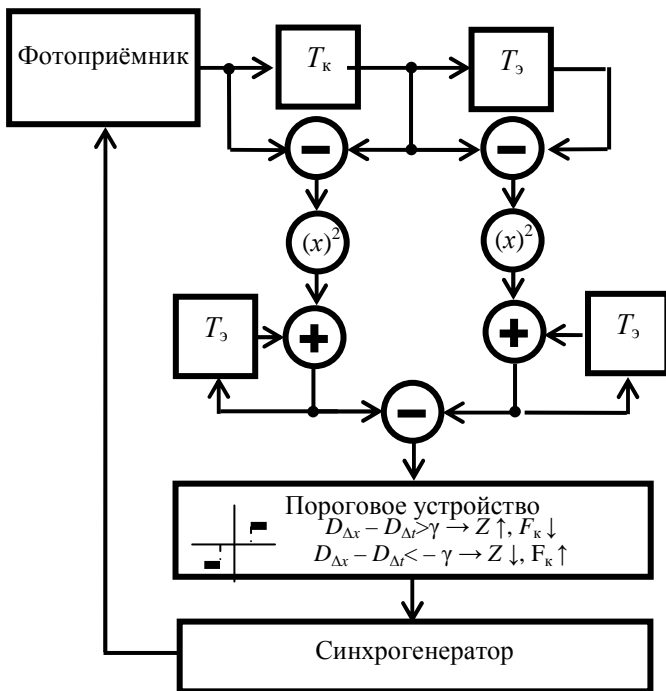


Рис. 2. Функциональная схема телекамеры, адаптивной к динамике сюжета и осуществляющей обмен чёткости на кадровую частоту по анализу соотношения межэлементной и межкадровой разности

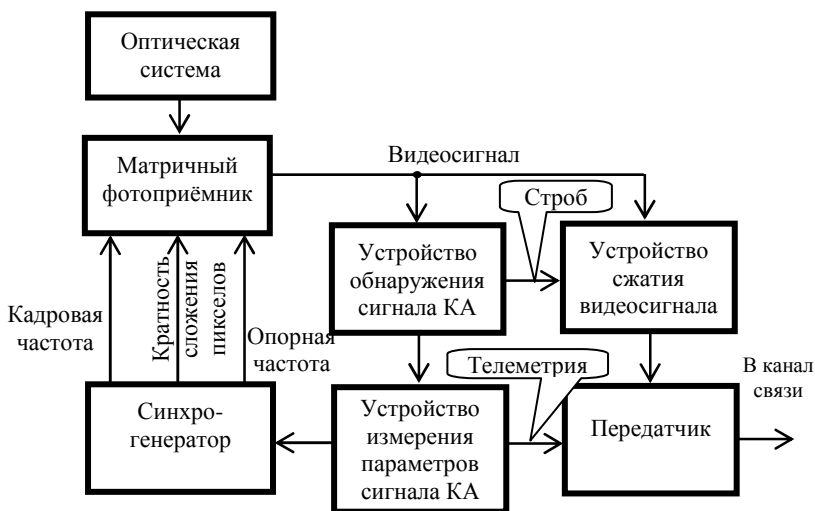


Рис. 3. Структурная схема адаптивной телевизионной системы

источника была по возможности постоянной и близкой к максимально возможному значению C_0 . По мере сближения КА по измеренному бортовым компьютером размеру наблюдаемого КА пиксели изображения группируются, сначала по 2×2 , затем по 3×3 и, на последнем этапе, по 4×4 . Изменение кадровой частоты при этом будет различно для матричных ПЗС и для КМОП сенсоров.

Реализация итерационного принципа контроля сближением КА вносит свою специфику и в кодер сжатия изображений. В силу борьбы с динамическими ошибками измерения параметров целесообразно использование методов сокращения пространственной избыточности в пределах кадра. При этом применимость известных методов сжатия оценивается не с позиций точности восстановления изображений, а по критерию потери точности об измеряемых параметрах объекта. Для систем, в которых по декодированным изображениям требуется измерять параметры КА в процессе сближения более перспективным, хотя и требующим существенно больших вычислительных затрат, направлением являются методы, основанные на выделении нерегулярно расположенных опорных точек без перехода в спектральную область. При этом адаптация кодера к дальности до наблюдаемого КА состоит в изменении коэффициента сжатия, который имеет своё критическое значение для каждого масштаба изображения КА или специального репера (мишени).

Размещение на КА специальных пассивных и активных реперов является операцией фиксирования количества и конфигурации опорных точек на изображении. С целью повышения помехоустойчивости обнаружения и измерения координат опорных точек изображения предложен ряд конфигураций и определены параметры реперов (количество реперов, размеры реперов и их фрагментов), используемых для контроля сближения КА, а также методы подсветки этих реперов. Принцип итерационного сближения КА приводит к правилу: реперы должны иметь различные размеры и неравномерность расположения на наблюдаемом телевизионной системой КА. На дальней дистанции должны использоваться реперы, максимально разнесённые на КА, в ближней зоне реперы должны быть расположены вблизи стыковочного узла КА.

Для второго класса измерительных систем космического телевидения рассмотрена задача объединения информации от телекамер наблюдения подстилающей поверхности и устройств ориентации КА по линии горизонта. Показано, что полное исключение инструментальных (угловых и временных) ошибок при привязке результатов наблюдения целевой телевизионной системой к подспутниковой точке возможно путём построения коаксиальной оптической схемы. Её особенностью является использование узкоугольного объектива для наблюдения Земли в надир и насадку из двух встречно направленных сферических выпуклых зеркал для наблюдения горизонта Земли, которые имеют отверстия для формирования изображения в узком поле зрения в той же фокальной плоскости, что и для широкоугольного

кольцевого поля зрения (рис. 4.) На фотоприёмной матрице узкое поле зрения отображается круговым полем с диаметром D_1 , кольцевое поле

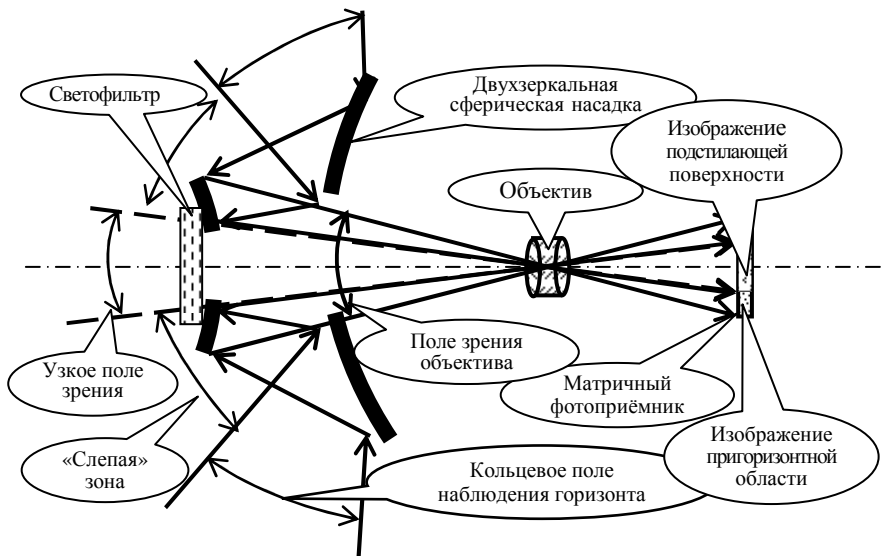


Рис. 4. Оптическая схема с коаксиально расположенными широкоугольной и узкоугольной оптическими системами и одним матричным фотоприемником

наблюдения пригоризонтной зоны – кольцом с внутренним диаметром D_1 и внешним диаметром D_2 . Изображение линии горизонта должно проходить по середине этой кольцевой зоны, т. е. иметь диаметр D_{Γ} , равный полусумме диаметров D_1 и D_2 . Между узким и широким полями зрения в схеме рис. 4, так же как и между статической и динамической ошибками в задаче (4) оптимизации параметров разложения, существует «конкуренция в борьбе за площадь» фотоприёмной матрицы: чем больше площадь каждого из этих секторов, тем больше априорный интервал изменения параметров, и тем больше количество информации в данном секторе. Для этой схемы изопериметрическая задача обусловлена ограничением общей площади фотоприёмной матрицы, а оптимизация основана на достижении максимума общей информации. Количество информации о смещении подспутниковой точки зависит от размеров априорного интервала и ошибки ϵ_c измерения координат подспутниковой точки:

$$I(x_c, \hat{x}_c) = \frac{1}{2} \log \frac{(D_2 - D_1)^2}{\epsilon_c}; \quad I(y_c, \hat{y}_c) = \frac{1}{2} \log \frac{(D_2 - D_1)^2}{\epsilon_c}; \quad (10)$$

Количество информации о координатах объекта также зависит от размеров априорного интервала и ошибки ϵ_o измерения координат объекта:

$$I(x_o, \hat{x}_o) = \frac{1}{2} \log \frac{D_1^2}{\epsilon_o}, \quad I(y_o, \hat{y}_o) = \frac{1}{2} \log \frac{D_1^2}{\epsilon_o}. \quad (11)$$

В общем случае наличия дополнительных параметров объектов (напр., размеров), не зависящих друг от друга, а также при обнаружении и измерении параметров нескольких объектов, количество целевой информации увеличивается пропорционально числу m измеряемых параметров. Для нахождения максимума суммы информации (10) и (11), взяв производную этой суммы по переменной D_1 и приравняв её нулю, получаем оптимальное значение D_1 , т.е. оптимальное распределение площади фотоприёмной матрицы между центральным и периферийным полями зрения:

$$D_{1\text{опт}} = \frac{m}{m+1} D_2. \quad (12)$$

В частном случае измерения координат и размеров одного объекта в узком поле зрения ($m = 2$) получаем оценку оптимального распределения площади матрицы: $D_{1\text{опт}} = \frac{2}{3} D_2$, $D_{\Gamma} = \frac{5}{6} D_2$.

Глава III посвящена вопросам тестирования измерительных систем космического телевидения. Разработана методика тестирования телекамер измерительных систем космического телевидения, позволяющая на основе компактной представительной выборки фоно-целевых ситуаций сформировать алгоритмы работы телекамер в режиме пересветки. Показано, что компактная представительная выборка фоно-целевых ситуаций при тестировании телекамер включает наблюдение на нескольких дистанциях мишени (освещённой либо Солнцем, либо рассеянным светом при затенении элементами МКС, либо фарой) на фоне МКС (освещённой либо Солнцем, либо фарой), а также МКС на фоне космоса и Земли с вариантами облачного покрова. Обоснованы 4 режима работы при пересветках, отличающиеся параметрами строба управления работой АРВН и АРУ и параметрами гамма-корректора телекамеры.

Разработана методика объективной оценки эффективности алгоритмов кодирования изображений, основанная на компактной представительной выборке сюжетов, сформированной с учётом широкополосности и предложенной меры нестационарности.

Глава IV посвящена моделированию работы различных узлов измерительных систем космического телевидения, а также характеристике практических работ, в которых нашли использование результаты работы.

Реализуемость адаптивной телевизионной системы с обменом чёткости и кадровой частоты по измерениям статических и динамических ошибок измерения координат объектов подтверждена экспериментами на макетах телекамер на основе ПЗС и КМОП матриц.

Эксперимент с использованием матрицы ПЗС показал, что при наличии запаса в быстродействии считывающего регистра при изменении размеров

групп от 1×1 до 4×4 и дискретном изменении кадровой частоты отношение сигнала к шуму считывания (с учётом возрастающего шума темнового сигнала) может поддерживаться примерно на постоянном уровне (рис. 5).

Использование серийных КМОП матриц позволяет реализовать два вида обмена кадровой частоты на чёткость. В первом варианте при уменьшении числа опрашиваемых пикселей («прореживании») может быть получена существенно большая кадровая частота, чем при группировании пикселей. В макете телекамеры реализованы обе возможности перехода от одной чёткости к другой либо путём группирования пикселей (2×2 и 4×4) либо прореживанием с пропуском одного пикселя и одной строки или трёх пикселей и трёх строк. Вариант с прореживанием может использоваться лишь при запасе по освещённости объекта. При этом характер зависимостей качества изображения, оцениваемого по среднеквадратической ошибке и разрешающей способности, не меняется. Ниже приводятся результаты эксперимента лишь для режима группирования сигнала пикселей.

Эксперимент с использованием КМОП матрицы и подвижных изображений испытательной таблицы и КА (рис. 6) показал, что динамическая ошибка, оцениваемая по дисперсии $D_{\Delta t}$ межкадровой разности, монотонно увеличивается при увеличении времени кадра и скорости движения, измерявшейся в пересчёте на фокальную плоскость объектива. Статическая ошибка, оцениваемая по дисперсии $D_{\Delta x}$ межэлементной разности, монотонно убывает по мере увеличения чёткости прямо пропорционально числу эффективных пикселей матрицы. Полная ошибка (сумма дисперсий $D_{\Delta t}$ межкадровой разности и $D_{\Delta x}$ межэлементной разности) показывает существование оптимального сочетания чёткости и кадровой частоты (рис. 7).

Обнаруженный максимум качества изображения отражает важный эффект влияния твердотельной технологии на изменение методов системного проектирования в прикладном телевидении.

Экспериментально подтверждена эффективность алгоритмов обнаружения, распознавания и измерения параметров изображений системы реперов для измерения параметров ориентации КА (рис. 8).

Экспериментально подтверждена эффективность использования в измерительных телевизионных системах методов кодирования изображений без перехода в спектральную область.

Моделирование подтвердило, что ошибки измерения промаха и параллакса имеют разные критические значения сжатия. При этом зависимость ошибки измерения параметров имеет более выраженный характер излома при достижении равенства энтропии сигнала и скорости передачи, чем при традиционной оценке качества по ошибке передачи формы сигнала изображения.

Экспериментально подтверждена полезность и реализуемость метода исключения инструментальных ошибок с помощью комплексирования в одной коаксиальной схеме телекамеры с одной фотоприёмной матрицей двух

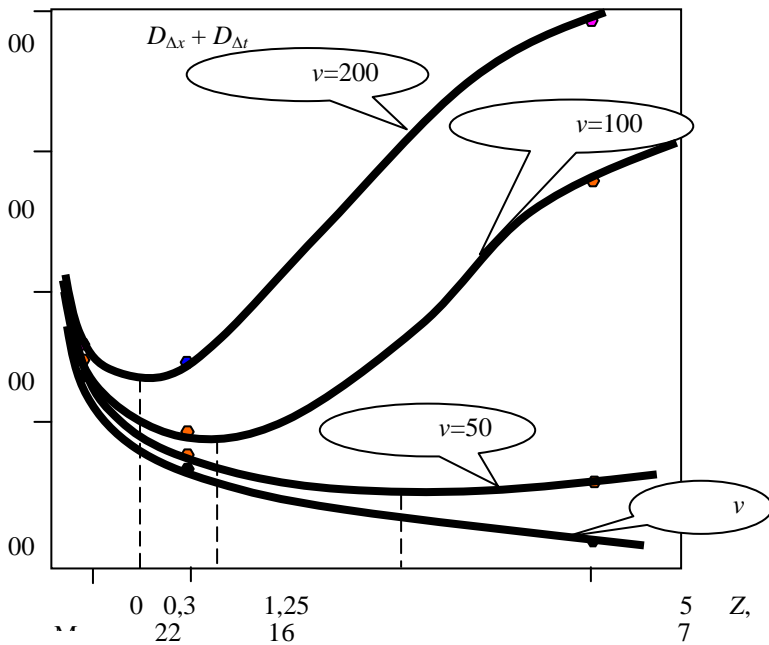


Рис. 7. Экспериментальная зависимость суммы дисперсий межэлементной разности $D_{\Delta x}$ и межкадровой разности $D_{\Delta t}$ от эффективного числа элементов фотоприёмной матрицы для различных скоростей объекта



Рис. 8. Пример обработки кадра изображения мишени с обнаружением и измерением координат опорных точек

концентрических полей зрения: узкого поля наблюдения подстилающей поверхности и кольцевого поля наблюдения горизонта Земли.

Разработанные методики тестирования телекамер нашли применение в ходе выполнения ОКР и проведения лётно-конструкторских испытаний телевизионной аппаратуры контроля сближения и стыковки пилотируемого транспортного корабля с российским сегментом МКС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В заключении обосновывается внутреннее единство решенных задач, отмечается личный вклад автора в их решение. Заключение содержит **выводы** по диссертации, содержащие конкретные количественные показатели эффективности разработанных методов, подтверждающие решение поставленных задач и служащие обоснованием положений, выносимых на защиту.

1. Разработан метод повышения помехоустойчивости телевизионных систем контроля стыковки КА путём адаптации параметров разложения изображения, позволяющий благодаря взаимобмену чёткости и кадровой частоты на основе правила равенства дисперсий межкадровых и межэлементных разностей на порядок расширить диапазон дальностей, в которых ошибка измерения промаха не превышает допустимого значения.

2. Разработан метод повышения помехоустойчивости контроля стыковки КА с помощью системы пассивных и активных реперов, позволяющий в 2...4 раза повысить точность измерения параметров дальности и ориентации КА.

3. Разработан метод повышения помехоустойчивости совмещения изображений подстилающей поверхности и линии горизонта путём их проекции на один матричный фотоприёмник, позволяющий исключить инструментальные ошибки совмещения осей и несинхронности накопления, чем повысить точность привязки обнаруживаемых объектов к подспутниковой точке.

4. Разработаны методики:

- тестирования телекамер контроля стыковки КА с установкой конечного набора формализуемых фоно-целевых ситуаций, позволяющие обеспечить наблюдение в условиях от сумерек до 130000 лк вплоть до попадания изображения Солнца в поле зрения телекамеры,

- тестирования кодеров сжатия изображений для передачи цифрового телевизионного сигнала по радиоканалам борт-борт и борт-Земля, основанная на использовании компактной представительной выборки видеосюжетов.

5. Разработанные методы прошли экспериментальную проверку, используются при проектировании перспективных систем космического телевидения и прошли апробацию частично в ходе стыковки космических аппаратов, частично при лабораторных испытаниях, о чём имеются соответствующие акты внедрения.

Совокупность изложенных теоретических и экспериментальных результатов показывает, что поставленные задачи решены, а выдвинутые научные положения доказаны.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

В изданиях из Перечня ВАК

1. Козлов, В. В. Реализация принципа итерационного сближения в космическом телевидении [Текст] / В. В. Козлов // Информация и космос. 2012, №1, с. 103–106.

2. Козлов, В. В. Комбинированная телевизионная система наблюдения и ориентации [Текст] / В. В. Козлов // Информация и космос. 2012, №2, с. 20–24.

3. Козлов, В. В. Адаптация космической телевизионной системы к этапам наблюдения объектов [Текст] / А. А. Манцветов, И. А. Зубакин, В. В. Козлов, Ш. С. Фахми, А. К. Цыцулин // Вопросы радиоэлектроники, сер. Техника телевидения, 2012, вып. 1, с. 29–43.

4. Козлов, В. В. Помехоустойчивость телевизионно-компьютерных систем контроля сближения и стыковки космических аппаратов [Текст]/ С. А. Половко, В. Л. Вартанов, В. В. Козлов // Вопросы радиоэлектроники, сер. Техника телевидения, 2012, вып. 1, с. 44–57.

5. Козлов, В. В. Чувствительность цветных одноматричных телевизионных камер [Текст] / А. А. Манцветов, П. С. Баранов, В. В. Козлов // Вопросы радиоэлектроники, сер. Техника телевидения, 2012, вып. 1, с. 58–71.

6. Козлов, В. В. Методика тестирования видеокодексов с учётом меры нестационарности изображений [Текст] / И. А. Зубакин, В. В. Козлов, А. К. Цыцулин // Телекоммуникации, 2012, №8, с. 29–33.

7. Козлов, В. В. Методы управления накоплением видеoinформации в твердотельных фотоприёмниках [Текст] / А. А. Умбиталиев, А. К. Цыцулин, А. А. Манцветов, В. В. Козлов, А. Е. Рычажников, П. С. Баранов, А. В. Иванова // Оптический журнал, 2012, №11.

Прочие издания

8. Козлов, В. В. Методы и технологии построения систем искусственного зрения на транспорте [Текст] / Ш. С. Фахми, В. В. Козлов, А. В. Лабетский // Всероссийская научно-практическая конференция «Транспорт России: проблемы и перспективы». СПб, 15–25 ноября 2011 г. ИПТ РАН, 2011, с.139–146.

9. Козлов, В. В. Итерационный телевизионный контроль сближения космических аппаратов [Текст] / И. А. Зубакин, В. В. Козлов, Ш. С. Фахми, А. К. Цыцулин // НТК «Радиолокация, навигация, связь» (РЛНС-2012), Воронеж, 17–19 апреля 2012 г. Воронеж, НПФ «САК ВОЕЕ», с.1657–1664

10. Козлов, В. В. Методы повышения помехоустойчивости телевизионной системы контроля сближения космических аппаратов [Текст]/ В. В. Козлов // НТК СПб отделения НТО РЭС 19–27 апреля 2012 г. СПб, ГЭТУ «ЛЭТИ», 2012, с. 198–199.

11. Козлов В. В. Адаптация параметров разложения изображения в прикладных телевизионных системах [Текст]/ А. К. Цыцулин, А. А. Умбиталиев, А. А. Манцветов, В. В. Козлов, А. Е. Рычажников //

Международная научно-техническая конференция «Телевидение и обработка изображений», СПб, 30 июня 2012, с. 3–8.

12. Козлов, В. В. Сравнение алгоритмов сжатия изображений в измерительных системах [Текст] / Ш. С. Фахми, В. В. Козлов, А. В. Лабцкий // Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе, сборник материалов всероссийской научно-практической конференции, ч. 2. – Йошкар-Ола, Марийский государственный технический университет, 2012. –с. 172–177.

13. Козлов, В. В. Рекурсия и параллелизм в задачах распознавания и поиска опорных точек изображения [Текст] / Ш. С. Фахми, В. В. Козлов, А. В. Лабцкий // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации, «Расознавание-2012»: сб. матер. X междунар. научн.-техн. конф., Юго-зап. гос. ун-т. Курск, 2012. –с. 154–156.

14. Козлов, В. В. Адаптация параметров разложения как метод повышения помехоустойчивости систем контроля сближения космических аппаратов. [Текст] / В. В. Козлов // НТК «Телевидение и обработка изображений». СПб, июнь 2012, с. 59–61.

15. Козлов, В. В. Алгоритм распознавания и измерения параметров изображений объектов [Текст] / В. В. Березин, Ш. С. Фахми, В. В. Козлов, А. В. Лабцкий, А. К. Цыцулин // Международная научно-техническая конференция «Телевидение и обработка изображений», СПб, 30 июня 2012, с. 78–81.

16. Козлов, В. В. Особенности методов сжатия при решении задач измерения параметров объектов изображений [Текст] / В. В. Березин, Ш. С. Фахми, В. В. Козлов, А. В. Лабцкий, О. Г. Кокаев, А. К. Цыцулин // Международная научно-техническая конференция «Телевидение и обработка изображений», СПб, 30 июня 2012, с. 82–84.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программное обеспечение для определения параметров изображения стыковочного узла космических аппаратов» №2012616977, зарегистрировано 03.08.2012 //В. В. Козлов, А. В. Лабцкий, Ш. С. Фахми, А. К. Цыцулин.

18. Козлов В. В. Бортовая телевизионная система космического аппарата. Патент № 118822 на полезную модель. Оpubл. 27.07.2012.//В. В. Козлов, В. П. Шебанов, И. В. Козлова, М. В. Быкова.

19. Козлов В. В. Способ формирования изображения различных полей зрения и телевизионная система для его реализации//Козлов В. В., Ресовский В. А., Умбиталиев А. А. и др. Заявка на выдачу патента № 2012112503 от 30.03.2012.

20. Козлов В. В. Устройство подсветки системы внешнего телевизионного обзора космического аппарата Заявка на выдачу патента № 2012108196 от 06.03.2012.

Подписано в печать 15.10.2012. Формат 60×80¹/₁₆. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Печ.л. 1.0
Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии Издательства СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.