ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«МНИТИ»

МОСКОВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ ИНСТИТУТ

ТЕХНИКА СРЕДСТВ СВЯЗИ

Серия: ТЕХНИКА ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Научно-технический сборник

Москва
2017 год

УДК 621.397
ББК 32.94
Т381

Главный редактор: к.т.н. Вилкова Н.Н.

Заместитель главного редактора: д.т.н., проф., член-корр. РАН Зубарев Ю.Б.

Редакционный совет: д.т.н., проф. Кукк К.И.; к.т.н., с.н.с. Барсуков А.Г.; Березанский В.М.; к.т.н., с.н.с. Сорока Е.З.; Калегин С.Н.

Составители: к.т.н., с.н.с. Барсуков А.Г.; Калегин С.Н.

Техника средств связи. Серия: Техника телевидения. // Научно-технический сборник. – Москва : ЗАО «МНИТИ», 2017. – 191 с.

В сборнике представлены научно-технические статьи по результатам исследований сотрудников ЗАО «МНИТИ».

Издание предназначено для специалистов в области прикладного телевидения и разработчиков специальной телевизионной техники.

Стиль изложения и оформление материалов оставлены в авторской редакции.

© ЗАО «МНИТИ», 2017 г.
Отпечатано в ЗАО «МНИТИ»

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие ……..… 4
Вилкова Н.Н. О результатах исследований ЗАО «МНИТИ» в 2017 году …... 5
Быструшкин К.Н., Безруков А.А. «Интернет вещей» как драйвер высокотехнологичной продукции и аппаратуры цифрового телевидения 9
Кукк К.И. Экран современного телевизора …….....…… 19
Дзюба В.И., Сухачев А.Б, Шапиро Б.Л. Об организационных структурах систем контроля бортовой радиоэлектронной аппаратуры ……..… 29
Сагдуллаев Ю.С., Ковин С.Д. Информационные аспекты построения разноспектральных систем авиационного телевидения …….…….…..... 41
Ковин С.Д., Сагдуллаев Ю.С. Выбор зон регистрации в разноспектральных системах авиационного телевидения ……..……..…. 57
Арзуманян Э.П. Билинейный интерполятор для геометрического преобразования изображений ……..…..… 69
Жигов Г.А., Зеленин С.А., Сорока Е.З., Филатов В.С. Метод постобработки цифрового изображения для уменьшения искажений дискретизации в ТВ-камере ……..…...…. 81
Шевчук А.А., Травина Е.И. Особенности селекции объектов интереса в многоспектральных системах технического зрения …….…..…. 93
Алимов А.Е., Шавкунов О.В., Сагдуллаев Ю.С., Ковин С.Д. Спектрозональная телевизионная камера …….…… 104
Салата Д.В. Математическая модель электрической части системы управления на примере многоканальной оптико-электронной визирной системы …….……...…… 112
Ануфриев А.Ю., Королев Д.Е. Разработка двухканального двухспектрального коллиматорного устройства ..….....… 122
Мещеряков А.Л. Наземные комплексы информационного обеспечения видео-аэросъемки (НКИО ВА) …….…...…….. 129
Федоров Ю. А., Есипов Д. А. Разработка унифицированного видеомодуля на отечественной элементной базе ……...……..… 142
Шулешкин А. П. Анализ помехоустойчивости широкополосных спутниковых каналов сеансой связи с летательными аппаратами …….……... 149
Шахрай В.И., Миколайчук Д.В. Алгоритм автоматической привязки изображений и его аппаратно-программная реализация ……..... 167
Барсуков А.Г., Ковтун И.И. Формальный аппарат функционально-реляционного проектирования автоматизированных систем ……. 178

ПРЕДИСЛОВИЕ

Радиоэлектронная промышленность – это один из основных секторов экономики России и движущая сила современного научно-технического прогресса. Многие отечественные разработки успешно конкурируют на мировом рынке, а некоторые являются уникальными и не имеют зарубежных аналогов.

Сегодня ЗАО «МНИТИ» (Московский научно-исследовательский телевизионный институт), будучи ведущим предприятием РФ в сфере телевидения, ведет разработки технологий и оборудования для решения как общих, так и специальных задач в данной области, продолжая традиции, сложившиеся во времена Советского Союза, когда МНИТИ играл ключевую роль в развитии телевизионной аппаратуры, применяемой в различных отраслях народного хозяйства и обороны страны.

В данном научно-техническом сборнике представлены некоторые результаты исследований и экспериментов, полученные сотрудниками института в рамках проводимых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в течение последних лет. Они представляют теоретический и практический интерес для специалистов соответствующих направлений отрасли, а также могут быть использованы в перспективных разработках смежных областей науки и техники (телекоммуникаций, оптики, голографии, иконики и т.д.). Сборник представляет собой рецензируемое отраслевое издание, которое размещается на Интернет-сайте ЗАО «МНИТИ», рассылается в министерства, ведомства, НИИ, ВУЗы и другие организации РФ (исследовательские центры, заводы, производственные объединения и т.д.), работающие в тематических направлениях, что позволяет ученым и разработчикам оперативно публиковать свои достижения, а читателям получать информацию из первоисточников.

Редакционная коллегия выражает благодарность всем авторам, рецензентам, экспертам и другим специалистам, принимавшим участие в подготовке представленного издания к выпуску, за ценные советы и замечания.

Вилкова Н.Н., к.т.н.

О РЕЗУЛЬТАТАХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАО «МНИТИ» В 2017 ГОДУ

ЗАО «МНИТИ» (Московский научно-исследовательский телевизионный институт) с момента основания является головной организацией России в области приемной телевизионной техники, ответственной за решение всего комплекса научно-технических задач по массовому производству отечественных телевизоров и современных технологий телевизионного вещания. Перспективные направления работ института состоят в повышении информативности цифровых телевизионных изображений и расширении областей применения телевидения.

Институт активно участвует в разработке системных и инновационных проектов для субъектов Российской Федерации (РФ) по построению наземных транспортных сетей на основе высокоскоростных линий и по созданию распределенного мультиплексирования в спутниковых сетях телерадиовещания. Продолжаются работы по реализации Федеральной целевой программы «Развитие телерадиовещания в Российской Федерации на 2009-2018 годы», разработке и внедрению новейших технологий в процессы производства радиоэлектронного оборудования на отечественных предприятиях, формированию законодательной базы в области стандартизации телерадиоаппаратуры и созданию нормативно-правовых актов.

Ближайшими задачами в области телевизионного вещание являются: консолидация действий научных, производственных, операторских и вещательных организаций, с целью определения основных стратегических направлений перспективного развития телевизионной отрасли, а также разработка рекомендаций для радиоэлектронной промышленности.

В настоящее время Научно-технический совет по цифровому телевидению при ЗАО «МНИТИ» объединяет 40 организаций и предприятий РФ. Вопросы вещательного телевидения отражены в ряде статей К.Н. Быструшкина и А.А. Безрукова, посвященных тенденциям развития мировой радиоэлектронной промышленности и, в частности, телевизионной отрасли, по Интернету вещей и т.д., а также К.И. Кукка по современным и перспективным технологиям изготовления экранов телевизоров, где отмечается отставание отечественной промышленности в производстве дисплейной техники.

Но этим не ограничивается научно-исследовательская деятельность института. Исследования и разработки проводятся по следующим тематическим направлениям:

- создание ситуационных центров для государственных структур, силовых ведомств и промышленных предприятий, информационных систем гражданского назначения и для специальных целей, в том числе систем управления и видеоконференцсвязи;
- разработка и создание геоинформационных систем гражданского и специального назначения с использованием электронных карт;
- разработка быстро развертываемых мобильных телевизионных систем автономного вещания, предназначенных для экстренного проведения эфирной трансляции, и ретрансляции телерадиопрограмм;
- разработка систем для объектов инфраструктуры, в том числе при проведении массовых мероприятий, предусматривающих обеспечение безопасности населения, управление ликвидациями последствий чрезвычайных ситуаций и информационное обеспечение органов власти и оперативных служб;
- испытание и сертификация радиоэлектронной аппаратуры, оборудования систем видеонаблюдения, вычислительной техники;
- разработка систем управления и видеонаблюдения авиационного гражданского и специального назначения, в том числе для беспилотных летательных аппаратов;
- исследование возможностей по созданию авиационного телевидения для решения актуальных задач народно-хозяйственного значения по экологическому мониторингу, контролю за нефте- и газопроводами, обеспечению аварийно-спасательных работ и работ при чрезвычайных ситуациях;
- разработка импортозамещающих технологий, позволяющих создавать радиоэлектронную аппаратуру с использованием отечественных электронных компонентов с последующей заменой импортных элементов интегральными схемами, в том числе, на основе отечественных базовых матричных кристаллов.

Настоящий научно-технический сборник отражает результаты исследований и разработок научного коллектива по решению ряда задач, связанных с перечисленными направлениями работы института.

Вопросы организации автоматизированного контроля параметров современной радиоэлектронной аппаратуры при её серийном производстве и в эксплуатации рассматриваются в статьях В.И. Дзюбы, А.Б. Сухачева и Б.Л. Шапиро. Отмечается, что применение автоматизированного встроенного контроля позволяет обеспечивать отбраковку изделий непосредственно перед их применением. В работе Э.П. Арзуманяна приводится универсальный алгоритм для практической реализации интерполятора, который позволяет модифицировать исходные изображения по масштабу, углу поворота и ракурсу.

В статье Г.А. Жигова, С.А. Зеленина, Е.З. Сороки и В.С. Филатова рассматривается метод обработки цифрового изображения, обеспечивающий снижение возникающих в телевизионной камере искажений дискретизации путем сочетания двумерной дискретной интерполяционной фильтрации и аналоговой фильтрации низких частот при его воспроизведении. В работе А.Е. Алимова, О.В. Шавкунова, Ю.С. Сагдуллаева и С.Д. Ковина рассмотрен принцип построения перспективной спектрозональной телевизионной камеры с использованием двухканальной оптической схемы расщепления входного лучистого (светового) потока, которая обеспечивает формирование трех зональных сигналов изображения в заданном спектральном участке, сформулированы требования к параметрам объектива, светоделительным зеркалам и оптическим фильтрам.

В сборнике представлено несколько статей, посвященных авиационному телевидению. В статье Ю.С. Сагдуллаева и С.Д. Ковина рассматриваются информационные аспекты построения разноспектральных систем авиационного телевидения, проводится их классификация, анализируется роль информационных признаков и вероятностные ситуации обнаружения и селекции объектов, с использованием различных спектральных участков (зон) регистрации лучистого (светового) потока. В другой статье этих же авторов рассматриваются вопросы, связанные с выбором зон регистрации лучистого потока для формирования разноспектральных изображений в системах авиационного телевидения.

В настоящее время пилотируемые и беспилотные летательные аппараты оснащаются многоспектральными системами технического зрения. В работе Е.И. Травиной и А.А. Шевчука рассматривается формирование спектрального признака объекта интереса с целью повышения тактико-технических характеристик многоспектральных систем технического зрения для визуального и автоматического анализа разноспектральных изображений. Обеспечение безопасности полетов современных военно-транспортных авиационных комплексов (АК) различного назначения предусматривает решение ряда важных задач. Одна из них рассматривается в работе Д.В. Салаты при построении математической модели части системы управления на примере многоканальной оптико-электронной визирной системы.

Одним из путей повышения эффективности применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является комбинирование каналов приема оптических сигналов различных спектральных диапазонов. Статья А.Ю. Ануфриева и Д.Е. Королева рассматривает коллиматорное устройство, относящееся к классу контрольно-проверочной аппаратуры, и предназначенное для оценки работоспособности комбинированных двухканальных оптико-электронных систем БПЛА. В работе А.П. Шулешкина проводится анализ помехоустойчивости широкополосных спутниковых каналов сеансой связи с летательными аппаратами. Решение задачи автоматической привязки изображений показано в статье В.И. Шахрая и Д.В. Миколайчука, в которой проводится математическое моделирование алгоритма такой привязки.

Две статьи посвящено наземным и мобильным комплексам информационного обеспечения и охраны объектов. В работе А.Л. Мещерякова рассматриваются наземные комплексы информационного обеспечения видео-аэросъемки предназначенные для обеспечения информационного взаимодействия модуля высотного видеонаблюдения – высотной телекоммуникационной платформы с заинтересованными службами на земле.

Вопросы импортозамещающих технологий представлены в статье Ю.А. Федорова и Д.А. Есипова. Статья посвящена особенностям разработки устройств отображения специальной аппаратуры на примере создания унифицированного видеомодуля. Рассматриваются специфические требования к разработке устройств отображения данного класса. Решаются задачи выбора

электронной компонентной базы и разработки программного обеспечения для отдельных модулей в соответствии с заданным алгоритмом функционирования.

Актуальным вопросам методологии разработки автоматизированных систем посвящена работа А.Г. Барсукова и И.И. Ковтуна, в которой развивается формальный аппарат функционально-реляционного проектирования автоматизированных систем предприятий ОПК.

В заключение следует отметить, что большинство опубликованных в сборнике работ уже нашло применение в практической научно-исследовательской и производственной деятельности института. Статьи представляют большой интерес для ученых и инженеров, работающих в представленных областях техники. Поднятые авторами проблемные вопросы являются поводом для проведения дальнейших работ.

УДК 621.397

Безруков А.А. (холдинг GS Group)
Быструшкин К.Н., к.т.н., с.н.с.

«ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ» КАК ДРАЙВЕР ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ И АППАРАТУРЫ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

В статье приводится описание перспективных технологий развития радиоэлектронной аппаратуры с учетом современных тенденций её объединения в «умные» комплексы.

Одним из ведущих направлений развития российской радиоэлектронной промышленности является расширение производства гражданской продукции. Согласно планам Минпромторга России к 2025-2030 годам доля гражданской продукции может составить не менее 50 % общего производства радиоэлектроники в РФ. Среди наиболее динамично развивающихся сегментов этого рынка можно выделить аппаратуру и оборудование для информационной среды «Интернет вещей» (англ. Internet of Things – IoT), к которой относятся «умные» телевизоры (англ. Smart TV) и другая современная телевизионная аппаратура с сетевыми функциями, позволяющая интегрироваться в систему «Умного дома».

Поэтому тенденции формирования рынка устройств «Интернета вещей» в ближайшие годы во многом будут определять векторы развития и телевизионной отрасли.

«Интернет вещей» – будущее уже началось

В 2016-2017 годах Центром телевизионных технологий ЗАО «МНИТИ» (ЦТТ) проведены аналитические исследования тенденций и перспектив развития цифровых телевизионных технологий, технологий телекоммуникаций, виртуальной реальности, «Интернета вещей» и «Умного дома». Результаты исследований обобщены в аналитическом отчете «Развитие современных и перспективных технологий приема телевизионных сигналов с предложениями по их реализации российскими производителями» [1].

Рис. 1. Концепция экосистемы «Интернета вещей».

Согласно отчету, одним из перспективных трендов мировых рынков развития радиоэлектроники является «Интернет вещей». Этот рынок интегрирует в себя телекоммуникационные технологии, вычислительную и бытовую технику типа «умные вещи» (смарт-устройства, от англ. Smart devices). «Интернет вещей» – это совокупность технологий, позволяющих «умным» устройствам общаться между собой посредством сети Интернет и обмениваться информацией без участия операторов [2, 3], что схематически показано на рисунке 1.

Эксперты из Cisco Business Solutions Group прогнозируют резкий рост числа подключенных к Интернету вещей устройств (Рисунок 2).

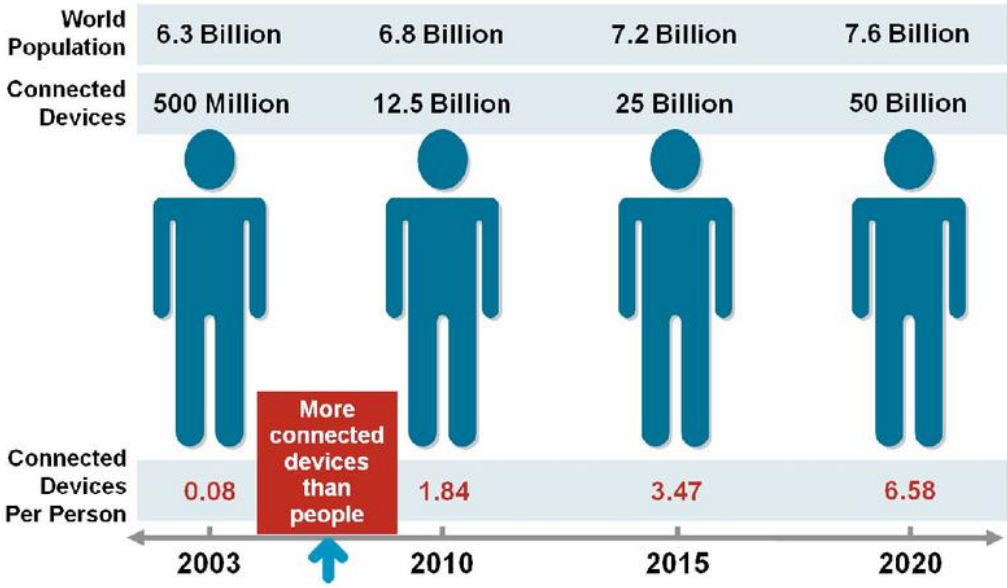


Рис. 2. Прогноз роста количества устройств IoT.

В России сегодня формируется рынок решений IoT, рост которого, начиная с 2018 года, составит до 40 % ежегодно. Это очень емкий рынок с точки зрения производимой для него электроники (и на уровне ЭКБ, микроэлектроники, и на уровне конечных устройств).

Рис. 3. Сегменты рынка «Интернета вещей».

Согласно результатам исследований ЗАО «МНИТИ» [1] технологии и решения «Интернета вещей» дают новые возможности развития передового производства, городской инфраструктуры и социально-значимых услуг. На рисунке 3 приведены основные сегменты рынка «Интернета вещей».

Наиболее восприимчивыми к новациям в области IoT в России являются предприятия из отраслей:

- умный транспорт (электромобили и общественный электротранспорт, умная транспортная инфраструктура, беспилотный транспорт);
- умная энергетика (системы хранения электроэнергии, умное потребление, возобновляемая энергетика);
- умная промышленность (автоматизация производства, включая роботизацию, системы управления, промышленная электроника, системы сквозного планирования всей цепочки сбыта и производства продукции и закупки комплектующих);
- умное сельское хозяйство (системы электронного планирования, мониторинга, контроля и управления с/х работами, умное агропромышленное производство);
- умное ЖКХ (системы автоматизированного учета и управления ЖКХ, умные сети водо-, газо- и электроснабжения, умный дом);
- медицина;
- онлайн-образование;
- умный ритейл (торговля) и системы доставки.

По оценкам аналитического агентства IDC, в 2016 году российские организации инвестировали более 4 млрд. долларов США в «Интернет вещей», включая затраты на оборудование, программное обеспечение, услуги и связь. В отчете «Russia Internet of Things Market 2016-2020», выпущенном в сентябре 2016 года агентством Forecast, приводится прогноз аналитиков, что в течение 2016-2020 годов рынок IoT будет увеличиваться в среднем на 21,3 % и к концу прогнозируемого периода достигнет 9 млрд. долларов [2].

Согласно проекту плана мероприятий «Развитие технологий в области «Интернета вещей» (далее – «Дорожная карта»), подготовленному Фондом развития Интернет инициатив (ФРИИ) для Минпромторга России, количество устройств «Интернета вещей» в России к 2020 году достигнет 500 миллионов [3]. Выход российских компаний на этот рынок будет способствовать загрузке предприятий оборонно-промышленного комплекса (ОПК) выпуском гражданской продукции и созданию высококвалифицированных рабочих мест в электронной и радиопромышленности.

Таким образом, «Интернет вещей» создает новый технологический уклад: цифровое управление цепочками создания добавленной стоимости, оптимизация использования ресурсов, преобразование бизнес-моделей

компаний и целых отраслей. К 2020 году более половины всех новых бизнес-процессов и систем будут включать в себя элементы экономики IoT. Цифровая реиндустриализация экономики приведет к цифровой революции, а IoT может стать одним из основных факторов её роста [2].

Участники рынка «Интернета вещей» активно объединяются в различные ассоциации для координации своей технической политики и защиты интересов её членов. На рисунке 4 представлены основные ассоциации в области «Интернета вещей» в России.

Рис. 4. Российские ассоциации и объединения в области «Интернета вещей».

Наличие сразу нескольких ассоциаций свидетельствует о большом интересе российских компаний к технологии и оборудованию IoT.

Среди наиболее массовых рынков устройств «Интернета вещей» без сомнения станет «Умная» домашняя электроника и бытовая техника, а также устройства обеспечения жизнедеятельности домов (охранные системы, отопление и водоснабжение, системы электропитания и т.д.), которые посредством беспроводных протоколов связи будут интегрированы в единую экосистему «Умного дома» (Рисунок 5).

Рис. 5. «Умный дом» на основе устройств «Интернета вещей».

«Интернет вещей» в телевидении

Одна из стратегически важных отраслей IoT – телевидение. Телевизионная отрасль становится основной средой для распространения «Интернета вещей» в домохозяйствах россиян (рисунок 6), так как смарт-телевизоры, цифровые ТВ-приставки и другие подобные устройства позволяют управлять вещами и процессами в системе «Умного дома» [1].

Эти новые возможности обусловлены тем, что цифровая обработка видео и звуковых сигналов в современных телевизорах с технологиями высокой и сверхвысокой четкости (4K-, 8K-, англ.: HDTV и UHDTV), обусловила применения в моделях нового поколения очень мощных цифровых процессоров, сравнимых по вычислительной мощности процессоров топовых моделей ноутбуков и настольных компьютеров. Кроме того, смарт-телевизоры имеют проводные (Ethernet) и беспроводные (Wi-Fi) интерфейсы для подключения к сети Интернет и встроенное программное обеспечение (браузеры) для навигации по сети. Более того, современный Smart TV-телевизор или цифровая приставка высокого класса также имеют интерфейсы

беспроводных сетей Bluetooth, что вместе с Wi-Fi позволяет легко объединять их в домашние сети DLNA (англ. Digital Living Network Alliance – «Объединение домашних цифровых сетей») [4].

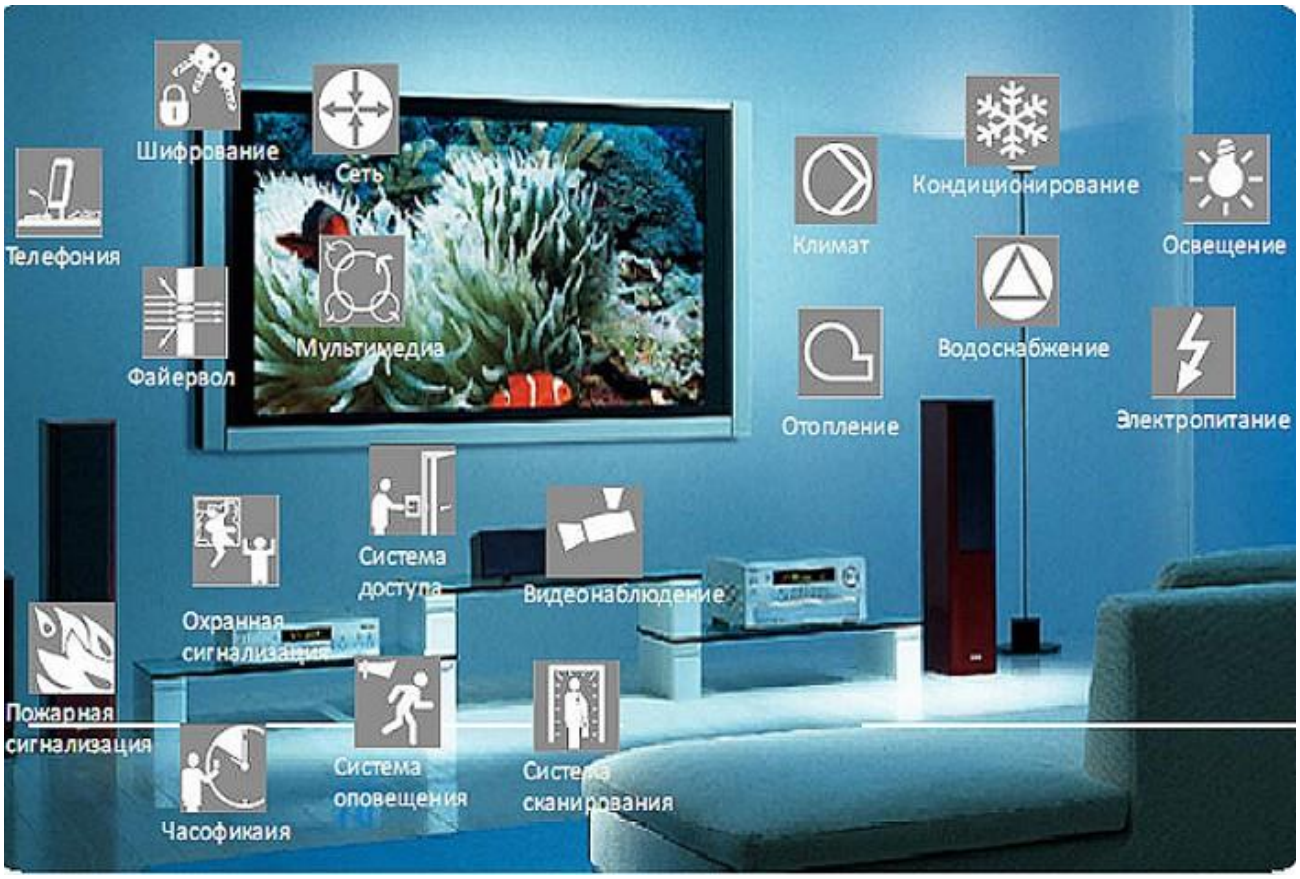


Рис. 6. «Умный дом» на основе телевизора с системой Smart TV.

Технология DLNA заслуженно пользуется широкой популярностью, что связано прежде всего с выходом на рынок функциональных систем Smart TV и игровых консолей последнего поколения. Она позволяют объединить домашние ПК, смартфоны, ноутбуки, телевизоры и другие устройства с поддержкой DLNA в единую мультимедийную группу для быстрого доступа и взаимодействия с данными различного размера и формата (рисунок 7), например, для обмена фильмами, музыкой и фотографиями [4].

Таким образом, согласно проведенным ЗАО «МНИТИ» исследованиям, Smart TV является прекрасной программно-аппаратной платформой для построения «Интернета вещей» в «Умном доме» [1, 2, 5, 6].

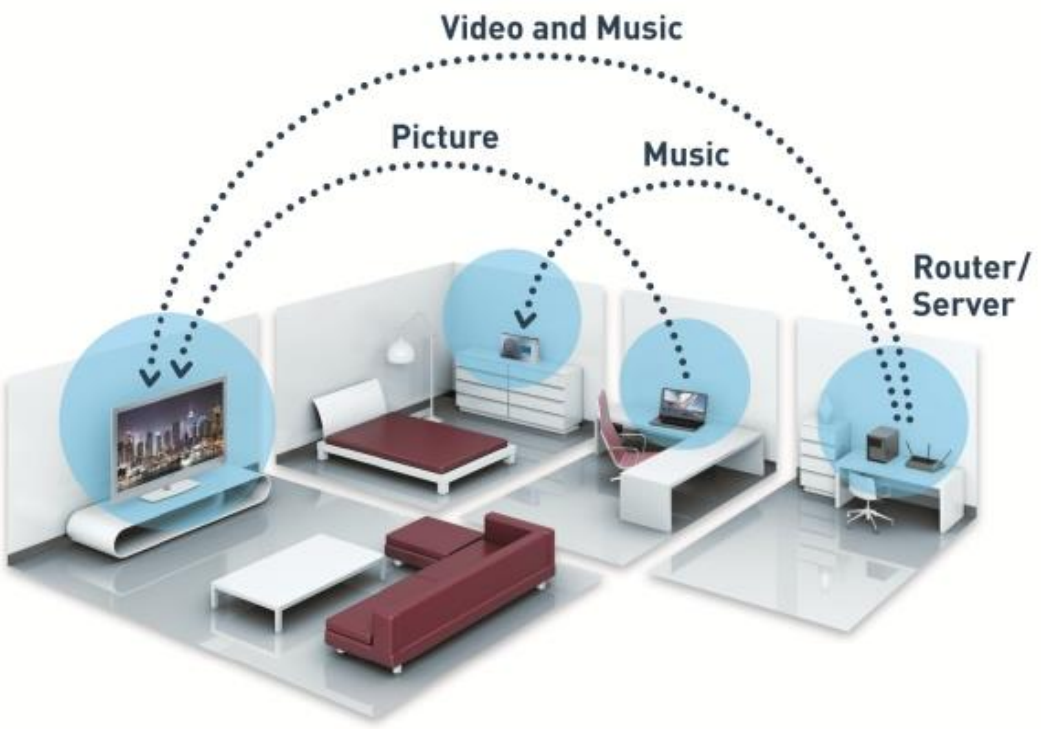


Рис. 7. Домашняя сеть DLNA на основе умного телевизора (Smart TV).

ЗАО «МНИТИ» и созданный на его основе Межотраслевой научно-технический совет по цифровому телевидению (НТС ЦТ) активно участвует в подготовке предложений по развитию «Интернета вещей» в России и координации этих работ. В том числе на основе аппаратуры и оборудования для цифрового телевидения совместно с членом НТС ЦТ – холдингом GS Group [5], который развивает идею построения локальной медиасети на территории домохозяйства: цифровая ТВ-приставка General Satellite трансформируется в управляющий медиацентр «умного дома».

В феврале 2017 года на инвестиционном форуме «Сочи-2017» GS Group впервые представил собственные инновационные продукты и технологии для реализации концепции системы «умного дома», под контролем которого находятся: комплексы освещения, электропитания, безопасности, климата, видеонаблюдения и различные медиа-устройства. Системе можно задавать новые параметры и расширять её функциональность, подключая дополнительное оборудование. Пользователь может управлять всеми процессами дистанционно с экрана мобильного телефона. Но для реализации этой концепции необходимо доработать программное обеспечение цифровой ТВ-приставки.

Периферийные устройства в экосистеме «Умного дома» от GS Group будут взаимодействовать друг с другом с помощью цифровой телевизионной приставки российского производства. Это решение холдинга стало логичным развитием общемировой тенденции в сфере «Интернета вещей»: от услуг телесмотрения операторы платного телевидения переходят к мультисервисному обслуживанию абонентов. Статус ТВ-приставки как центра «Умного дома» – качественно новый этап в развитии приемного оборудования (Рисунок 8).

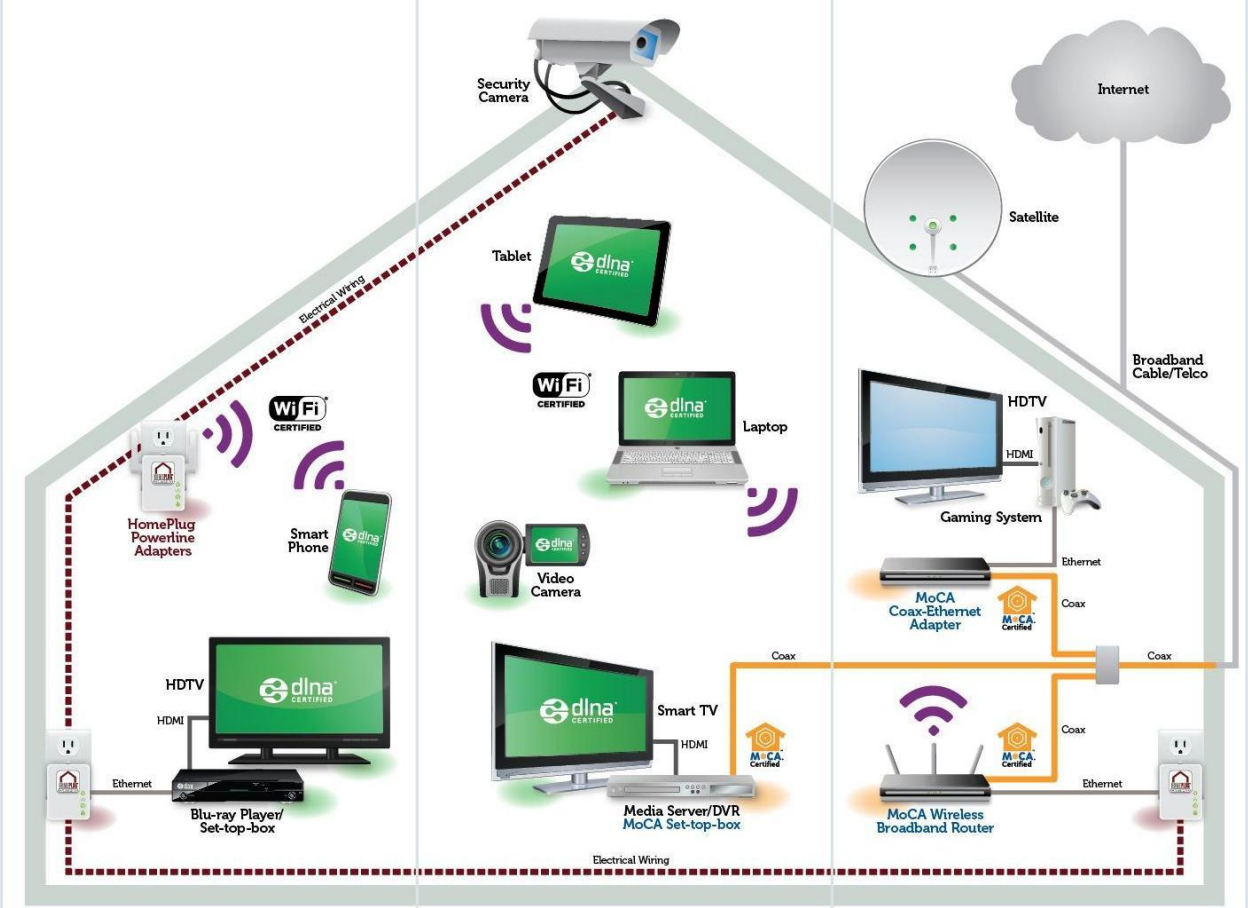


Рис. 8. Пример архитектуры «Умного дома» с использованием цифровой приставки STB (англ. set-top-box).

Кроме того, в современных телекоммуникационных системах постоянно возникают вопросы безопасности и устойчивости к кибератакам. Поэтому разработанное холдингом оборудование сконструировано на основе оригинального набора собственных программно-аппаратных средств, которые препятствуют несанкционированному доступу к контенту и дистанционному управлению абонентским оборудованием.

Как и всякий коммутатор «Умного дома», такие приставки требуют высокопроизводительных микропроцессоров и такие решения в России уже имеются. Холдинг GS Group является крупнейшим российским объединением в области разработки и производства микроэлектроники и потребительской электроники, что позволяет ему создавать собственные технологические решения, успешно применяемые в различных электронных устройствах как в России, так и за рубежом. Среди разработок холдинга имеются микропроцессоры и системы кодирования сигнала, которые могут использоваться для безопасной передачи данных внутри «Умного дома». Также GS Group имеет собственную производственную площадку для реализации проектов в области разработки электроники и микроэлектроники на контрактной основе – инновационный кластер «Технополис GS» в Калининградской области РФ.

Таким образом, сегодня в России имеются все предпосылки для нового витка в развитии рынка абонентского телевизионного оборудования с системами Smart TV и «Умных» цифровых приставок, которые их владельцы могут использовать не только для просмотра телевизионных программ, но и как основу для построения систем «Умного дома» и «Интернета вещей», поэтому проекты развития «Интернета вещей» должны рассматриваться как одно из приоритетных направлений промышленной политики в России. ЗАО «МНИТИ» и холдинг GS Group ведут работы по подготовке и реализации этих проектов в области цифровой телевизионной техники и в ближайшее время планируется провести ряд исследований в данном направлении.

Литература

1. Аналитический отчет «Развитие современных и перспективных технологий приема телевизионных сигналов с предложениями по их реализации российскими производителями». ЗАО «МНИТИ», 2016.
2. Быструшкин К.Н. «Проект организации в России производства оборудования и аппаратуры для IoT («Интернета вещей») совместно с ассоциацией Тайзен.Ру». Тезисы доклада на заседании рабочей группы Координационного совета Минпромторга России. М., 2016.

3. Проект плана мероприятий («дорожная карта») «Развитие технологий в области Интернета вещей». Фонд развития Интернет-инициатив (ФРИИ). – М., 2016. – С. 1-12.
4. Технология DLNA. Использование DLNA на телевизорах Smart TV и других устройствах [Электронный ресурс]. URL: http://help-wifi.com/o-besprovodnyx-texnologiyah/texnologiya-dlna-ispolzovanie-dlna-na-televizorax-smart-tv-i-drugix-ustrojstvax/.
5. Быструшкин К.Н. «Веление времени» // Журнал «Телеспутник», № 4. – СПб., 2017. – С. 20-21.
6. Быструшкин К.Н., Степаненко Л.Н. «Телевизоры: какими они будут завтра?» // Сборник трудов XVI Международного конгресса НАТ «Телевидение и радио в цифровом мире: глобальные тенденции и национальные особенности». – М., 2012. – С. 30-35.

УДК 621.397

Кукк К.И., д.т.н., проф.

ЭКРАН СОВРЕМЕННОГО ТЕЛЕВИЗОРА

В статье приводится описание современных технологий изготовления экранов телевизоров, а также их роли в развитии и производстве телевизионной техники в конкретной стране, с целью анализа возможностей импортозамещения такой техники в российской промышленности и её развития в будущем.

Введение

Экран телевизионного приемника является его важнейшей составной частью, на котором отображается принимаемая видеоинформация. Со времен Бориса Розинга (1869-1933 годы), и почти до конца прошлого столетия в качестве экрана телевизора использовалась электронно-лучевая трубка (ЭЛТ). Применительно к телевизору такая ЭЛТ широко именуется как «кинескоп». Начиная с 50-х годов XX века, в ходе естественного перманентного совершенствования ЭЛТ, наиболее значимой модернизацией был переход от черно-белого экрана к цветному.

В настоящее время кинескопы практически полностью вытеснены плоскими или изогнутыми дискретными экранами различного размера в зависимости от назначения. Под дискретным экраном понимается некая поверхность, состоящая из регулярной матрицы электрически изменяемых, дискретных элементов изображения (пикселей) в строках и столбцах.

Современные дискретные экраны выполняются на различных физических принципах и отличаются технологическими особенностями изготовления, во многих случаях характерными для конкретного изготовителя.

Принципы работы современных экранов

В начале на смену ЭЛТ пришли газоразрядные и жидкокристаллические экраны. Первый прототип плазменного дисплея был разработан в Иллинойском университете в 1964 году. Плазменная панель – это матрица газонаполненных ячеек, расположенных между двумя параллельными стеклянными пластинами. Внутри расположены электроды, шины сканирования, адресации и подсветки (рисунок 1). Суб-пиксели имеют размеры 200x200x100 мкм. Ячейки заполняются такими газами как: неон, ксенон, гелий, аргон, иногда с добавлением ртути. Управление осуществляется по строкам и столбцам с помощью электрических импульсов.

При подведении к электродам высокочастотного напряжения начинается ионизация газа (образование плазмы). В плазме происходит емкостной высокочастотный разряд, приводящий к ультрафиолетовому излучению, которое, в свою очередь, вызывает свечение люминофора зеленым, красным или синим цветом. Плазменные экраны обладают высокой контрастностью и большим сроком службы. Однако технологии плазменных экранов себя полностью исчерпали в основном, из-за возможностей по разрешающей способности экрана. При современной тенденции перехода к телевидению сверхвысокой четкости следует ожидать, что изготовление плазменных дисплеев будет носить заказной характер для каких-либо специальных целей.

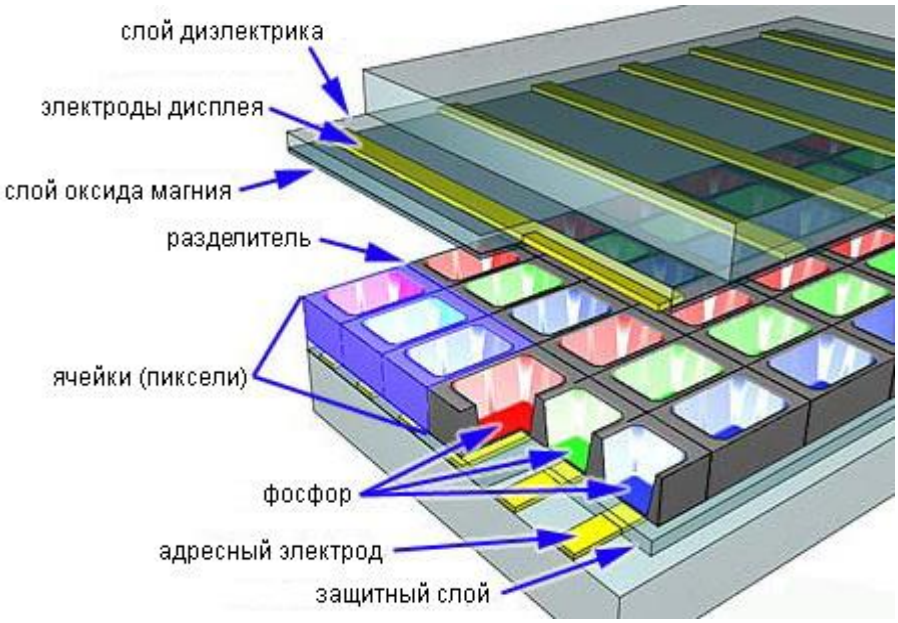


Рис. 1. Структура плазменного экрана.

Наибольшее распространение в настоящее время получили дисплеи на основе жидких кристаллов (ЖК, англ.: LCD). Первый жидкокристаллический монохромный экран был разработан фирмой RCA в 1970 году, цветной ЖК-экран с диагональю 3 дюйма был создан в 1987 году компанией Sharp. ЖК-экраны основаны на применении вещества (цианофенил), которое находится в жидком состоянии, но при этом обладает некоторыми свойствами, присущими кристаллическим телам. Это жидкости, обладающие анизотропией свойств (в частности, оптических), связанных с упорядоченностью в ориентации молекул. Такие экраны используют явление поляризации светового потока. Кристаллы-поляроиды способны пропускать только ту составляющую света, вектор электромагнитной индукции которой лежит в плоскости, параллельной оптической плоскости поляроида. Для оставшейся части светового потока поляроид будет непрозрачным. Эти аморфные вещества за их схожесть с кристаллическими веществами по электрооптическим свойствам, а также за способность принимать форму сосуда, назвали жидкими кристаллами.

Общим признаком всех ЖК-дисплеев является матрица, имеющая слой с ячейками жидких кристаллов, способных менять свои характеристики светопропускания, и задней подсветкой. Многоцветное изображение в таких дисплеях образуется за счет RGB-триады, суть которой показана на рисунке 2.

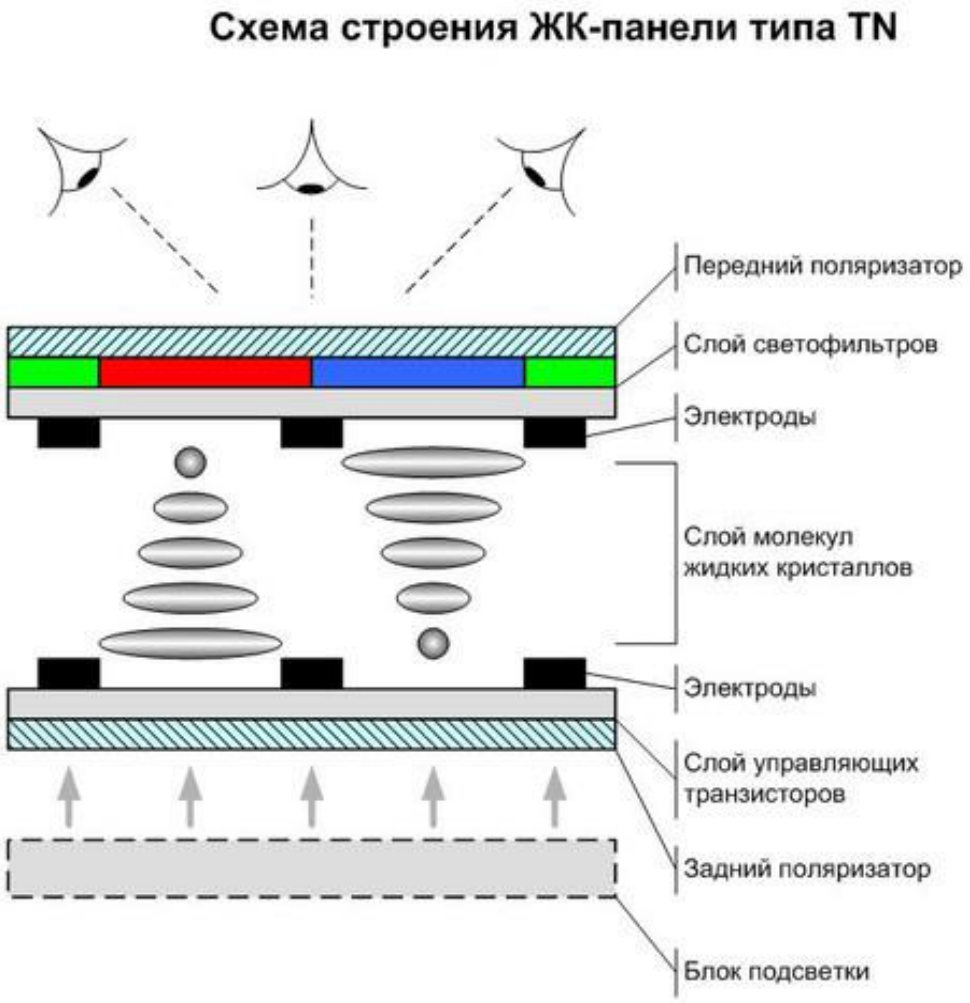


Рис. 2. Построение RGB-триады ЖК-экрана.

В составе ЖК-матрицы имеются строчные и столбцовые драйверы, которые обеспечивают управление конкретными ячейками. При выборе строки и столбца используется напряжение различной полярности, что исключает явления гидролиза и диссоциации сложных органических соединений, из которых состоит ЖК-материал, при протекании тока одного направления. Подавляющее число ЖК-экранов выполняется с активной матрицей, в которой используются тонкопленочные транзисторы (англ.: TFT), а каждый пиксел матрицы оснащен тремя такими транзисторами, что позволяет повысить качество воспроизводимого изображения.

За последние 20 лет существования ЖК-экранов предприятиями-изготовителями (Hitachi, NEC, Fujitsu, Samsung и др.) было внесено большое число схемных и технологических усовершенствований, что позволило повысить качественные показатели экранов, увеличить их размеры и снизить стоимость.

В 1977 году был предложен первый монохроматический светодиодный экран (англ.: LED screen, LED display) для телевизоров, в котором пикселем является один или несколько светодиодов (рисунок 3). После появления достаточно ярких цветных светодиодов появились цветные LED-телевизоры.

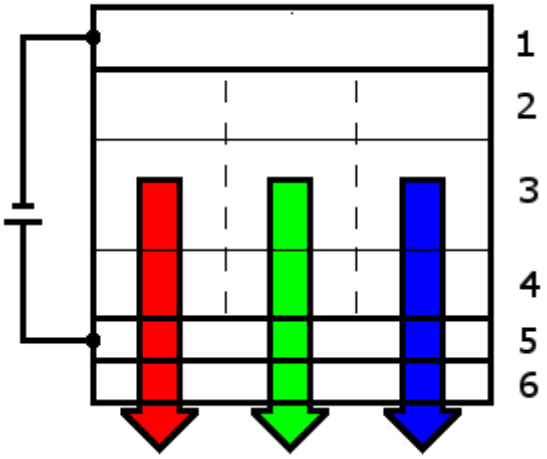


Рис. 3. Органический светодиод. 1 – катод (-), 2 – эмиссионный слой, 3 – испускаемое излучение, 4 – проводящий слой, анод (+).

Экраны, использующие светодиоды из органических соединений, излучающих свет при прохождении через них электрического тока (англ.: OLED), называются OLED-экранами. Для создания таких светодиодов используются тонкопленочные многослойные структуры, состоящие из слоев нескольких полимеров. При подаче на анод положительного относительно катода напряжения поток электронов протекает через прибор от катода к аноду. Таким образом, катод отдает электроны в эмиссионный слой, а анод забирает электроны из проводящего слоя или, другими словами, анод отдает «дырки» в проводящий слой. То есть, эмиссионный слой получает отрицательный заряд, а проводящий слой – положительный. Под действием электростатических сил электроны и «дырки» движутся навстречу друг к другу и при встрече рекомбинируют. Это происходит ближе к эмиссионному слою, потому что в органических полупроводниках «дырки» обладают большей подвижностью, чем электроны. При рекомбинации электрон теряет энергию, что сопровождается излучением (эмиссией) фотонов в области видимого света, поэтому слой и называется эмиссионным.

Сегодня широкое распространение получает технология на основе «квантовых точек» (QD-LED, QLED от англ. quantum dot – «квантовая точка»).

Квантовые точки – это полупроводниковые нанокристаллы, которые светятся, когда подвергаются воздействию тока или света. Они излучают различные цвета в зависимости от их размера и материала, из которого они изготовлены.

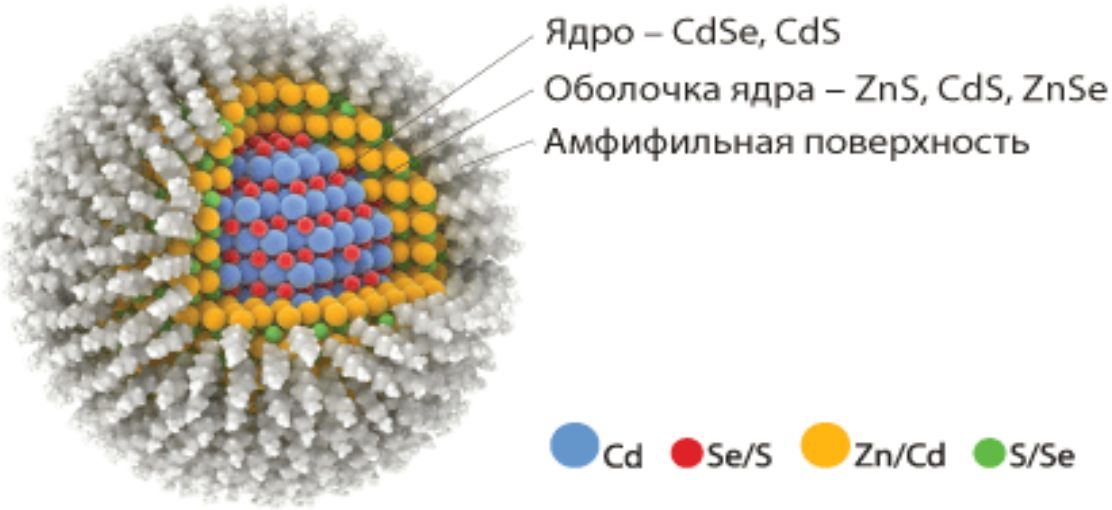


Рис. 4. Квантовые точки.

О перспективных экранах

OLED-экраны и технологии на основе «квантовых точек» следует отнести к перспективным технологиям. Эти технологии поддерживаются и развиваются двумя южнокорейскими мировыми гигантами по производству потребительской электронной техники Samsung Electronics и LG Electronics. Samsung Electronics нацелен на развитие технологии «квантовых точек» для телевизионных экранов, а LG Electronics видит перспективу в OLED-технологии.

Для технологии «квантовых точек» декларируются гораздо более высокие показатели, чем у OLED технологий, такие как: яркость, контрастность, глубина цвета и т.д. Исследователи заявляют, что экраны на «квантовых точках» могут иметь в пять раз меньшее энергопотребление по сравнению с обычными ЖК-экранами, а также более продолжительный срок службы по сравнению с OLED-экранами. Также утверждается, что стоимость их производства может быть вдвое ниже стоимости изготовления ЖК- и OLED-экранов. С другой стороны, в новых OLED-экранах нет внутренней подсветки и той многослойности, которая свойственна LED-моделям, что позволило сделать их очень тонкими. Такой дисплей имеет расширенный спектр цветопередачи телевизора, соответствующий 99 % требований стандарта для цифровых

кинотеатров, и может передавать до миллиарда цветовых оттенков. Но пока, по мнению большинства зарубежных специалистов, чаша весов склоняется в пользу OLED-технологий. Так, например, Япония создает единого крупного производителя средств отображения типа OLED.

Тем не менее, еще длительное время ЖК-технологии, особенно в телевидении, будут сохранять свое лидирующее положение благодаря относительно низкой стоимости и удовлетворительному качеству изображения даже при современных повышенных требованиях.

Кроме того, общей тенденцией последних лет является увеличение размеров телевизионных экранов, что, в основном, определяется рыночным спросом. В свою очередь, это связано с быстрым ростом телевизионного вещания сверхвысокой четкости (4K-, 8K-, англ.: UHDTV) и перспективами перехода на него полностью.

Производство экранов для современных телевизоров

Экран является основной составляющей в себестоимости современного телевизора. Так, например, в ЖК-телевизорах стоимость экрана составляет в среднем 72 %, а в OLED-телевизорах она достигает 82 %. Поэтому производство телевизоров, как правило, связано с владением (или совладением с производителями) технологиями изготовления средств отображения.

До последнего времени ведущим производителем ЖК-панелей большого размера являлась корейская компания LG Display, рыночная доля которой составляла более 25 %. Второе место занимала компания Samsung Display, производящая более 20 % экранов. Третьим по величине поставщиком была тайваньская компания Innolux с долей в 15 %. Но в последние годы больших успехов добились китайские производители. Такие компании, как BOE Technology и China Star Optoelectronics Technology (CSOT), планомерно увеличивают инвестиции в производство ЖК-панелей, в том числе большого размера. Китайское производство быстро набирает силу благодаря поддержке правительства своей страны и за счет роста спроса на их внутреннем и внешнем рынках. По данным исследовательской фирмы IHS Technology, в 2015 году доля компаний из КНР на рынке 32-дюймовых панелей достигла 70 %, а сегодня китайские производители стремятся захватить и сегменты рынка более крупных экранов.

Благодаря высокой конкуренции со стороны китайских производителей ЖК-панели резко подешевели. Так, средняя продажная цена 32-дюймовых ТВ-панелей высокого разрешения (англ.: Full HD), которая в начале 2015 года доходила до 101 доллара США, в конце 2015 года упала до 67 долларов, а в январе-марте 2016 года – до 60 долларов. В настоящее время технология производства ЖК-экранов условно насчитывает одиннадцать поколений – G (от англ. generation – «поколение»), характеризуемых размером стеклянных подложек при групповом производстве (таблица 1).

Таблица 1. Размеры стеклянных подложек при групповом производстве.

Поколение	**Размер подложки, мм**	**Год внедрения**
G1	320x400	до 1987
G2	370x470	1987
G3	360x465	1994
G4	550x650	1997
G5	680x880	2000
G6	1100x1250	2002
G7	1500x1800	2004
G8	1870x2200	2005
G9	2160x2460	2006
G10	2850x3050	2009
G11	2320x3000	2011

В мае 2016 года китайская компания CSOT начала строительство в городе Шэньчжене крупнейшей в мире фабрики по выпуску жидкокристаллических панелей по технологии G11. Завод, затраты на который оцениваются в 7,8 млрд. долларов США, будет производить сверхбольшие панели высокого разрешения, а именно, ТВ-экраны размером 65 дюймов и более. Запуск коммерческого производства на новом предприятии CSOT запланирован на 2018 год.

В недалеком будущем следует ожидать появления рулонных телевизионных экранов. Это не значит, что такие экраны заменят традиционные, с жесткой конструкцией, но они займут на телевизионном рынке свое положение как нишевый продукт.

Также показательно, что технологии производства экранов для 4K-телевизоров в настоящее время освоены большинством изготовителей средств отображения, а вот экраны для 8K-телевизоров первыми взялись освоить тайваньские компании Innolux и AU Optronics (AUO) и уже в середине 2016 года они изготовили небольшую партию 65-дюймовых экранов. С отставанием на несколько месяцев осваивают новую продукцию корейские коллеги во главе с LG Display, а китайский производитель экранов BOE Technology намерен начать выпуск UHDTV-экранов во второй половине 2017 года.

О производстве экранов в России

К сожалению, производства современных телевизионных экранов в России не существует, что является одной из важнейших причин отсутствия серийного выпуска отечественных телевизоров. Технологическое отставание в этой области негативно сказывается как на разработке, так и на выпуске средств отображения для других отраслей народного хозяйства и обороны страны.

В советское время все телевизоры комплектовались электронно-лучевыми трубками собственного изготовления, для чего были задействованы заводы Министерства электронной промышленности: Запрудненский завод, Московский электроламповый завод, Новосибирский завод «Экран», Ленинградское ПО «Позитрон», Московский завод «Хроматрон», Воронежский электроламповый завод и др., но в основном разработка велась в НИИ «Платан». И только, когда годовое производство телевизоров приблизилось к 10 млн. шт., страна стала покупать корейские кинескопы индийской сборки.

В ситуации, которая сложилась в России сегодня, наиболее правильным является привлечение зарубежных инвестиций и технологий для развития этого направления электронной промышленности. Сложность новых технологий и высокая стоимость их разработки определяет необходимость привлечения отечественных и зарубежных инвестиций и укрепление взаимовыгодного научно-технического сотрудничества с ведущими мировыми компаниями. При этом непременными условиями являются:

- постепенное углубление локализации технологических основ;
- активное участие государственного сектора электроники.

По мере накопления технологического и производственного опыта, возникает необходимость и возможность приобретения зарубежных высоко-

технологичных радиоэлектронных активов, позволяя одновременно реализовать импортонезависимость.

Стоит отметить, что с учетом допущенного отставания российской электроники, начинать освоение производства современной дисплейной техники целесообразно с привлечением зарубежных компаний с ЖК-экранов 6-8 поколений, но даже в этом случае для ликвидации отставания понадобится не менее 10 лет.

С февраля 2017 года началось объединение двух крупных холдингов: «Российская электроника» и «Объединенная приборостроительная корпорация». Разработчики и изготовители средств отображения и приборные компании будут работать в тесном контакте, преследуя единые цели, связанные с созданием самых современных высокотехнологичных радиоэлектронных изделий для всех категорий потребителей. Имеются основания полагать, что такое важное направление радиоэлектронной техники, как средства отображения, включая телевизионные экраны, займут достойное место среди продукции этого объединения.

Литература

1. Средства отображения информации: современные разработки и рынок России. Научно-практический семинар // Журнал «Электроника: наука, технология, бизнес». № 8, 2005 [Электронный ресурс]. URL: http://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_967_314.pdf.
2. Жуков Н. Электронные средства отображения. От наноматериалов к нанотехнологии // Журнал «Электроника: наука, технология, бизнес». № 5, 2008. – С. 38-41.

УДК 623.746.4

Дзюба В.И., к.т.н.
Сухачев А.Б, д.т.н.
Шапиро Б.Л.

ОБ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СТРУКТУРАХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

В статье рассмотрены вопросы организации автоматизированного контроля параметров современной радиоэлектронной аппаратуры при её серийном производстве и эксплуатации.

Введение

Бортовая радиоэлектронная аппаратура для перспективных авиационных комплексов относится к высокотехнологичной продукции. В настоящее время в технологической цепочке производства современной радиоэлектронной аппаратуры значительное место занимают процессы контроля и настройки. В тоже время, по мере развития и усложнения бортовой радиоэлектронной аппаратуры, все более остро встает вопрос о повышении её эксплуатационной надежности и возможности прогнозировать готовность к работе в заданные моменты времени путем измерения основных контролируемых параметров.

Основные принципы организации контроля параметров радиоэлектронной аппаратуры

Важнейшим фактором, определяющим облик процедуры контроля радиоэлектронной аппаратуры, является её организационная структура. Она определяет:

– виды составных частей (функциональных узлов и блоков) аппаратуры, участвующих в процессе контроля;
– статус составных частей, определяющих взаимодействие;
– организацию формирования результатов контроля.

Структурная схема подчиненности основных частей процедуры контроля радиоэлектронной аппаратуры представлена на рисунке 1.

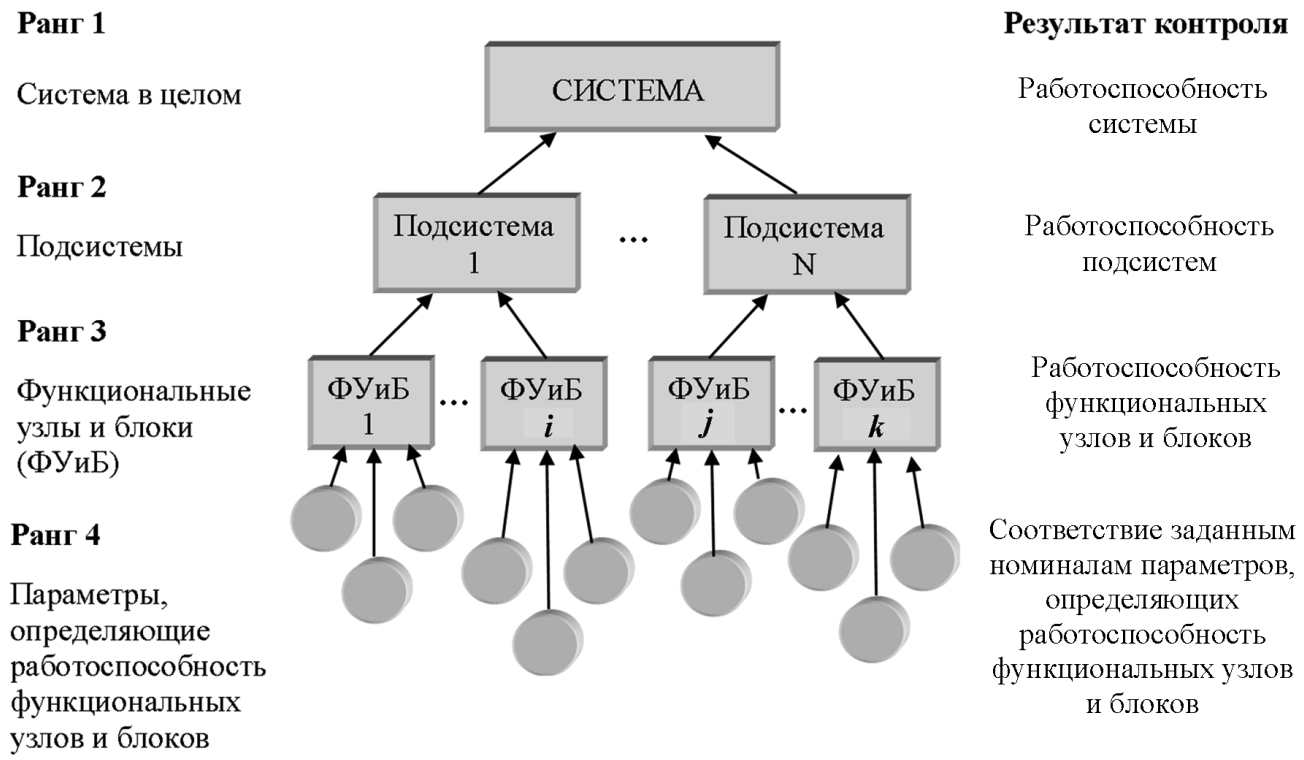


Рис. 1. Структурная схема подчиненности основных частей процедуры контроля радиоэлектронной аппаратуры.

Безотказность радиоэлектронной аппаратуры в числе прочих составляющих обеспечивается достоверностью контроля, которая, в основном, определяется полнотой контроля (если пренебречь вероятностями ложного и необнаруженного отказов, отказа системы контроля в процессе проведения контроля). Полнота контроля оценивается выражением

$$\eta = \lambda_K / \lambda_\Sigma , \qquad (1)$$

где: λ_Σ – интенсивность отказов объекта контроля в целом; λ_K – интенсивность отказов контролируемой части объекта контроля.

В настоящее время процессы контроля и настройки занимают значительное место в технологической цепочке производства современной радиоэлектронной аппаратуры. По мере развития и усложнения бортовой радиоэлектронной аппаратуры все более остро встает вопрос возможности прогнозировать её готовность к работе в заданные моменты времени.

Основные элементы автоматизации контроля параметров радиоэлектронной аппаратуры при серийном производстве

На стадии серийного производства для настройки и регулировки основных функциональных узлов и блоков применяется специализированное технологическое оборудование (СТО). СТО может также применяться для проведения приемо-сдаточных испытаний и входного контроля изделия в целом.

В состав СТО входят специализированные внешние устройства: контрольно-проверочная аппаратура, средства измерения, средства документирования и пр. Сокращение длительности операций контроля основных параметров, повышение достоверности результатов контроля и минимизация влияния человеческого фактора обеспечивается применением в СТО элементов информационных технологий.

Специальное программное обеспечение (СПО) для организации контроля радиоэлектронной аппаратуры на стадии серийного производства строится по схеме подчиненности основных частей процедуры контроля (рисунок 1). Данное СПО, как управляющее и информационное ядро оборудования по проверке параметров, обеспечивает проведение тест-контроля электронных узлов и блоков и изделия в целом и, при необходимости, выдает оператору рекомендации по настройке контролируемого объекта.

В процессе эксплуатации применение дополнительного оборудования для проведения контроля радиоэлектронной аппаратуры на различных стадиях её эксплуатации затруднительно, а порой и невозможно.

Основные элементы автоматизированного встроенного контроля

Для обеспечения контроля в процессе эксплуатации в современной бортовой радиоэлектронной аппаратуре широко применяются элементы автоматизированной встроенной системы контроля (АВСК), которые позволяют производить оценку состояния аппаратуры без использования дополнительных внешних устройств.

Целью АВСК аппаратуры является выявление отклонения контролируемых параметров от номинала за пределы установленного допуска и, как следствие, оценка готовности аппаратуры к выполнению своего функционального предназначения. Устройства АВСК достаточно просто могут

быть реализованы в аппаратуре с применением современных вычислительных средств.

Структурная схема устройства АВСК приведена на рисунке 2.

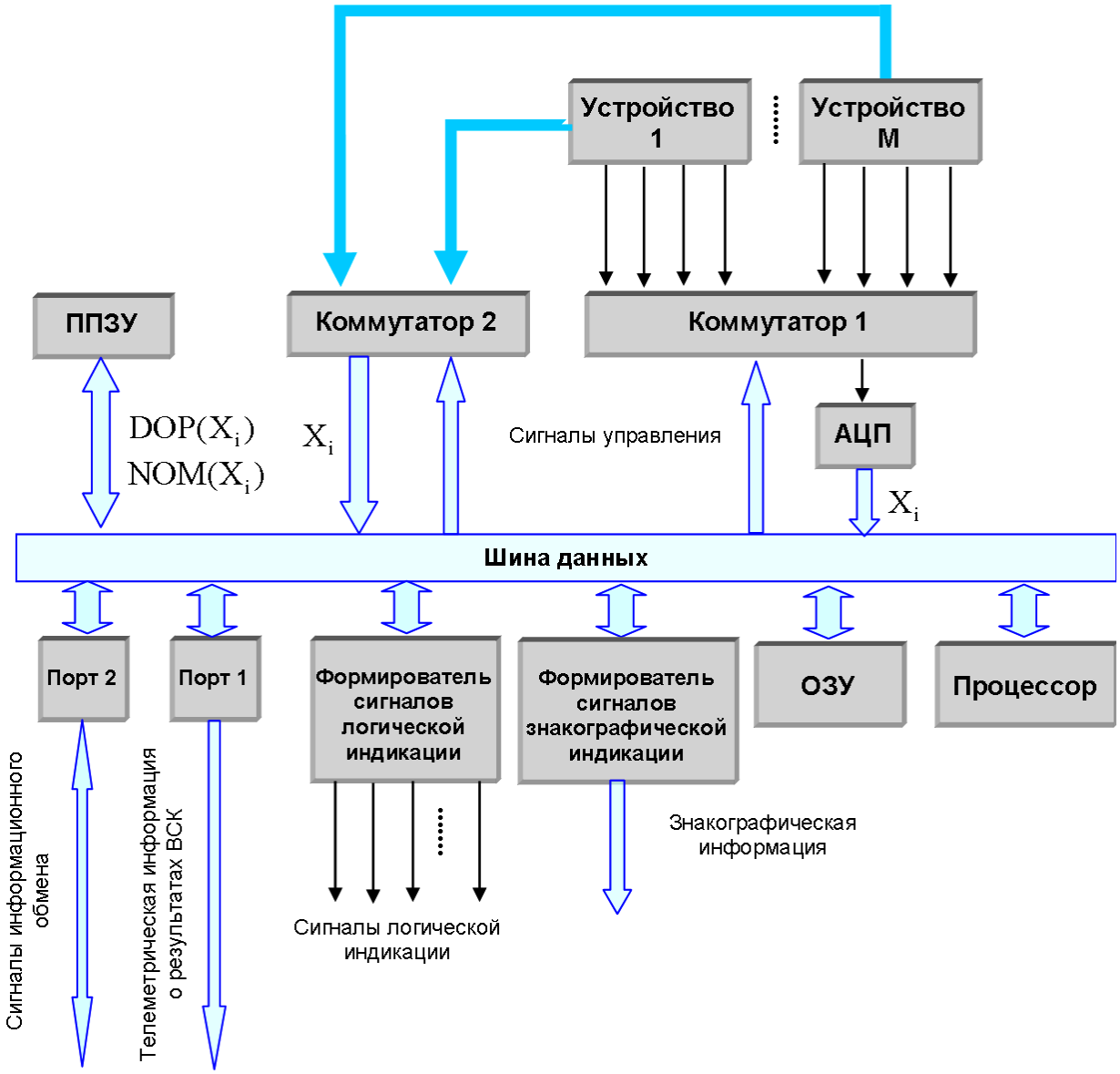


Рис. 2. Структурная схема устройства автоматизированного встроенного контроля.

Значения номиналов контролируемых параметров NOM(X_i) и допустимых отклонений DOP1(X_i) и DOP2(x_i), где i – номер контролируемого параметра, вводятся предварительно в ППЗУ АВСК через устройство интерфейса (Порт 2).

Выборки текущих значений контролируемых параметров X_i последовательно считываются с выходов устройств и функциональных блоков аппаратуры, подлежащих контролю. Контролируемые параметры могут быть представлены в аналоговой или логической (булевой) форме, а также в форме

двоичного параллельного кода, разрядность которого согласована с разрядностью процессора устройства АВСК.

Отображение результатов системы контроля может производиться на экране многофункционального монитора или ТВ-индикатора контролируемой системы, работающей в режиме отображения знакографической информации. Некоторые аналоговые параметры, особенно подлежащие регулировке, удобно отображать в виде шкал с оцифровкой текущего значения индикационной меткой. Вид вывода параметров на экран выбирается, исходя из эксплуатационных особенностей системы.

Сложные радиоэлектронные комплексы обычно состоят из большого числа функциональных блоков и устройств, зачастую конструктивно размещаемых в различных местах объекта. Поэтому системы встроенного контроля строятся по принципу измерительной пирамиды (рисунок 1). Измерительной пирамидой называют такую последовательность измерения и отображения результатов, когда низшие звенья (функциональные устройства) контролируются детально, но в следующее по рангу звено поступает лишь обобщенная информация, а в высшее звено передается лишь главная информация, характеризующая состояние объекта контроля в целом.

Организация АВСК предусматривается по трем уровням, различающимся глубиной контроля.

Полный контроль (включает процедуры рангов 1-4, рисунок 1) проводится при организации входного контроля аппаратуры и приемо-сдаточных испытаниях на заводах-изготовителях, ремонтных базах и при проведении регламентных работ. При проведении полного контроля может использоваться дополнительная пультовая контрольно-проверочная аппаратура (КПА), автоматизированная контрольно-проверочная аппаратура (АКПА) или специализированное технологическое оборудование (СТО), обеспечивающие опрос по заданной программе, индикацию и документирование всех контролируемых параметров. В этом режиме имеется возможность внешней стимуляции измерения и документирования определенных параметров, подлежащих регулировке. При отсутствии дополнительной АКПА (СТО) полный контроль может проводиться по программе устройства АВСК с полным отображением контролируемых параметров на экране монитора и

документированием их штатными средствами, входящими в систему. Пример индикации контролируемых параметров приведен в таблице 1.

Таблица 1.

Параметр	**Значение**				**Результат**
	номинал	максимум	минимум	текущее	
01	12 ,60	18,86	11,34	12,56	годен/брак
02	-12,60	-18,86	-11,34	-12,38	годен/брак
….				…	…
17	5,00	5,25	4,75	5,11	годен/брак
….					…
блок 1					годен/брак
….					…
система					годен/брак

Предполетный контроль (включает процедуры рангов 1-3, рисунок 1) проводится с целью оценки соответствия основных контролируемых параметров заданным по значениям ТУ. Контроль проводится по программе устройства АВСК, а его результаты отображаются в виде:

– знакографической информации на экране монитора;
– сигналов логической индикации на пульте оператора и (или) на выносном индикаторном пульте, подключаемом на время проведения предполетного контроля к специальному разъему аппаратуры;
– записи в бортовой контрольно-записывающей аппаратуре (КЗА).

Индикационный пульт может использоваться на этапе отработки и испытаний аппаратуры, а также при отсутствии на борту многофункционального индикатора знакографической информации.

Примерный вид отображения результатов предполетного контроля представлен в таблице 2.

Таблица 2.

Параметр	**01**	**02**	**…**	**18**	**…**	***M***
Результаты контроля	Годен/Брак	Годен/Брак	...	Годен/Брак	...	Годен/Брак

Контроль в полете (включает процедуры рангов 1-2 для систем с резервированием аппаратуры или процедуру ранга 1 для систем без резервирования, рисунок 1) проводится по программе устройства АВСК с целью оценки готовности системы в целом к применению без индикации результатов контроля отдельных параметров. В результате проведения данного вида контроля на экране многофункционального монитора оператора отображается информация о готовности к применению системы в целом. Сигнал о готовности к применению системы в целом, а также сигналы готовности подсистем (при необходимости) дублируются сигналами логической индикации (светодиодами, светящимися транспарантами) на пульте управления оператора. При этом в бортовую контрольно-записывающую аппаратуру производится запись значений основных контролируемых параметров системы и сигналов готовности основных узлов и блоков.

Работа системы АВСК

После включения устройства АВСК проводится самотестирование процессора с выдачей сообщений о его готовности. При положительном результате тестирования формируется сигнал «Процессор готов» и начинается контроль параметров системы. При отрицательном результате тестирования формируется сигнал «Брак процессора». Дальнейший контроль при этом не проводится. Для повторения запуска необходимо провести повторное включение аппаратуры.

Процедура обработки каждого из контролируемых параметров сводится к оценке его отклонения от номинала (рисунок 3) в соответствии с выражением

$$\mathrm{NOM}(X_i) - \mathrm{DOP1}(X_i) \le X_i \le \mathrm{NOM}(X_i) + \mathrm{DOP2}(X_i), \qquad (2)$$

где $\mathrm{DOP1}(X_i)$ и $\mathrm{DOP2}(X_i)$ – допустимые отклонения параметра X_i от номинала $\mathrm{NOM}(X_i)$ в меньшую и большую сторону соответственно.

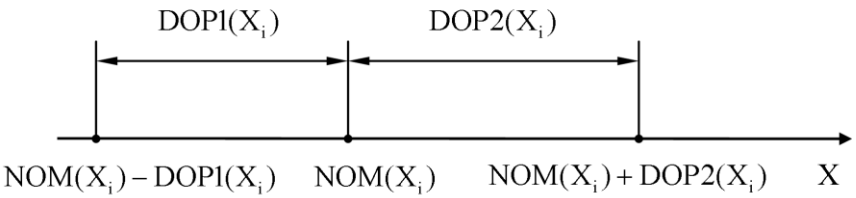


Рис. 3. Оценка отклонения контролируемого параметра от номинала.

Для упрощения реализации предлагаемого выражения (2) в алгоритме автоматизированного контроля его можно разбить на две группы неравенств.

Условием попадания контролируемого значения параметра X_i в интервал $\left[NOM(X_i) - DOP1(X_i); NOM(X_i)\right]$ является выполнение неравенств

$$\begin{cases} X_i < NOM(X_i); \\ X_i \geq NOM(X_i) - DOP1(X_i). \end{cases} \quad (3)$$

Условием попадания контролируемого значения параметра X_i в интервал $\left[NOM(X_i); NOM(X_i) + DOP2(X_i)\right]$ является выполнение неравенств

$$\begin{cases} X_i > NOM(X_i); \\ X_i \leq NOM(X_i) + DOP2(X_i). \end{cases} \quad (4)$$

Значение параметра $ISPR\left(X_i\right)$ – результат оценки контролируемого параметра X_i, индицируется (при необходимости) на устройстве отображения и в логической форме записывается в ОЗУ для использования при анализе работоспособности аппаратуры в целом.

Структурная схема оценки попадания контролируемого параметра в заданный интервал приведена на рисунке 4.

Структурная схема оценки контролируемого параметра, представленного в логической форме, приведена на рисунке 5.

Структурная схема процедуры АВСК приведена на рисунке 6. Здесь внешние сигналы: $CONTR1$, $CONTR2$, $RESERV$ определяют глубину контроля и наличие резервирования аппаратуры:

$CONTR1 = TRUE$ – режим полного контроля;

$CONTR2 = TRUE$ – режим предполетного контроля;

$CONTR1 = FALSE$ + $CONTR2 = FALSE$ – режим контроля в полете;

$RESERV = TRUE$ – наличие резервирования аппаратуры.

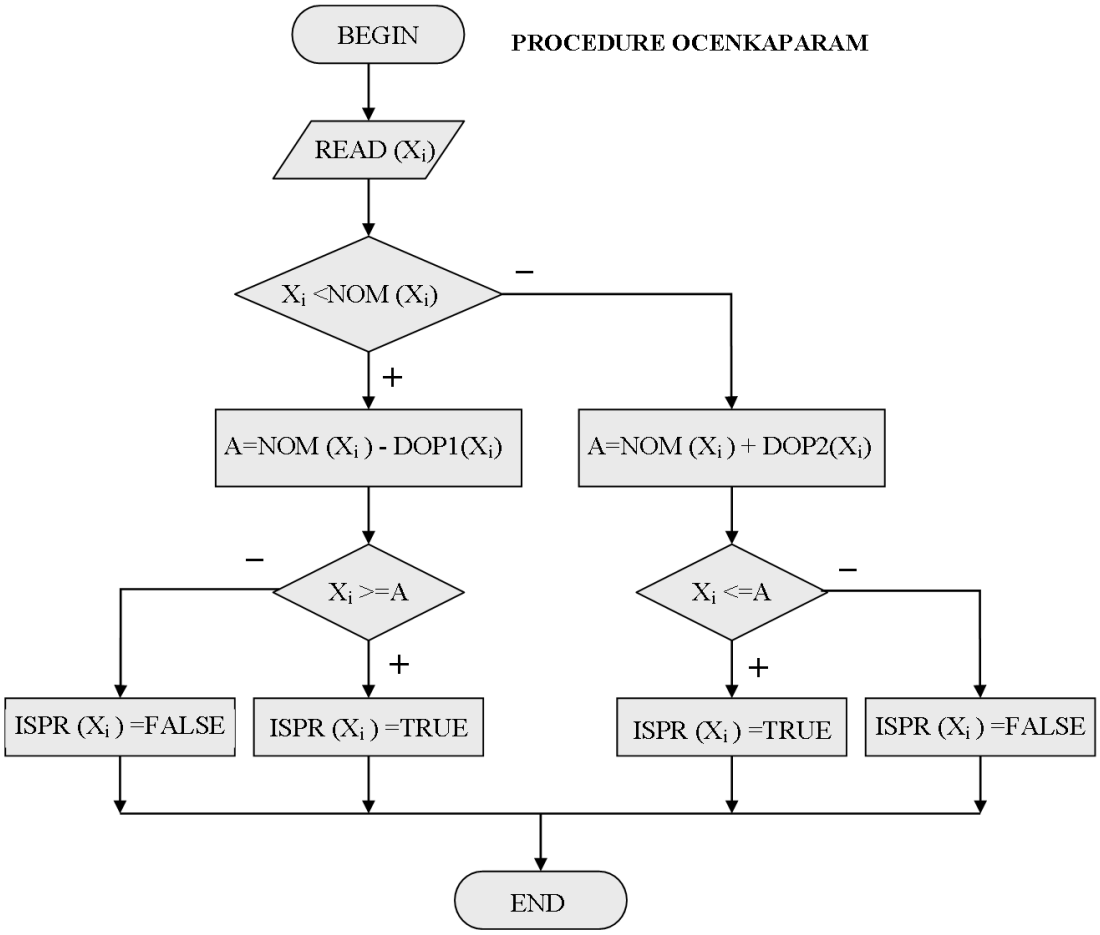


Рис. 4. Структурная схема процедуры OCENKA PARAM – оценки попадания контролируемого параметра в заданный интервал.

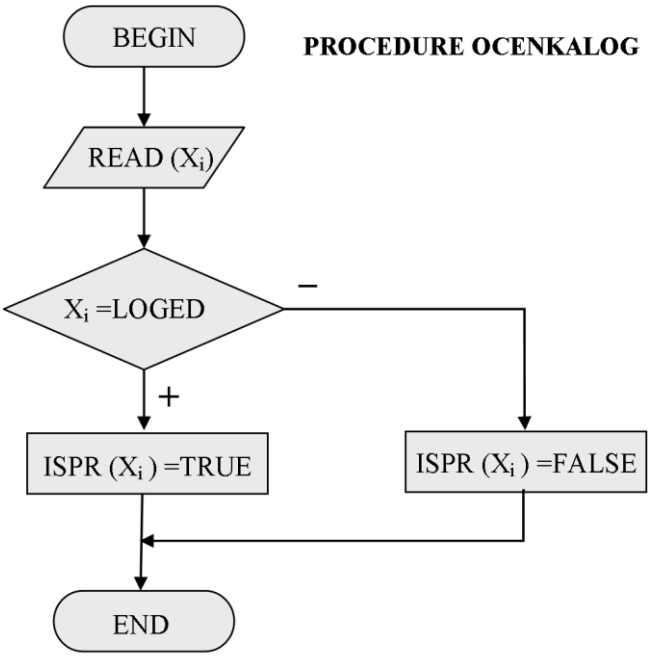


Рис. 5. Структурная схема OCENKA LOG – оценки параметров, заданных в логической форме.

Оценка общей работоспособности аппаратуры по массиву из *n* контролируемых параметров осуществляется в соответствии с выражением

$$\mathrm{ISPRAP} = \mathrm{ISPR}\left(\mathrm{X}_0\right) \times \mathrm{ISPR}\left(\mathrm{X}_1\right) \times \ldots \times \mathrm{ISPR}\left(\mathrm{X}_n\right). \qquad (5)$$

После оценки общей работоспособности аппаратуры принимается решение о продолжении или окончании цикла АВСК.

В случае положительного результата оценки общей работоспособности аппаратуры формируется сигнал «АППАРАТУРА ИСПРАВНА», формируется отчетный документ по результатам контроля и цикл контроля прекращается. Аппаратура переводится в режим «Работа».

При отрицательном результате оценки общей работоспособности аппаратуры цикл АВСК автоматически повторяется до получения положительного результата или до выключения аппаратуры.

При наличии резервирования блоков или аппаратуры в целом АВСК проводится для всех комплектов. После перехода основного комплекта в режим «Работа» режим АВСК продолжается, и, в случае отрицательного результата на каком-либо этапе контроля, производится реконфигурация системы (ручная или автоматическая) путем замены неисправного блока или узла резервным.

Для большинства бортовых систем регулировка параметров и замена блоков в полете невозможны. Работа таких систем проводится в течение ограниченного времени. Отклонение отдельных параметров от нормы в процессе работы приводит к полному отказу аппаратуры только в исключительных случаях. После получения положительного результата АВСК в полете имеется достаточно высокая вероятность выполнения поставленной задачи. Наличие параллельного с режимом «Работа» АВСК подразумевает прерывание работы системы при наличии отклонения от нормы хотя бы одного параметра. Поэтому для бортовой аппаратуры, не имеющей резервирования, после перехода в режим «Работа» проведение АВСК нецелесообразно. Освободившиеся после окончания АВСК вычислительные мощности целесообразно использовать для решения текущих задач управления аппаратурой и обработки сигналов.

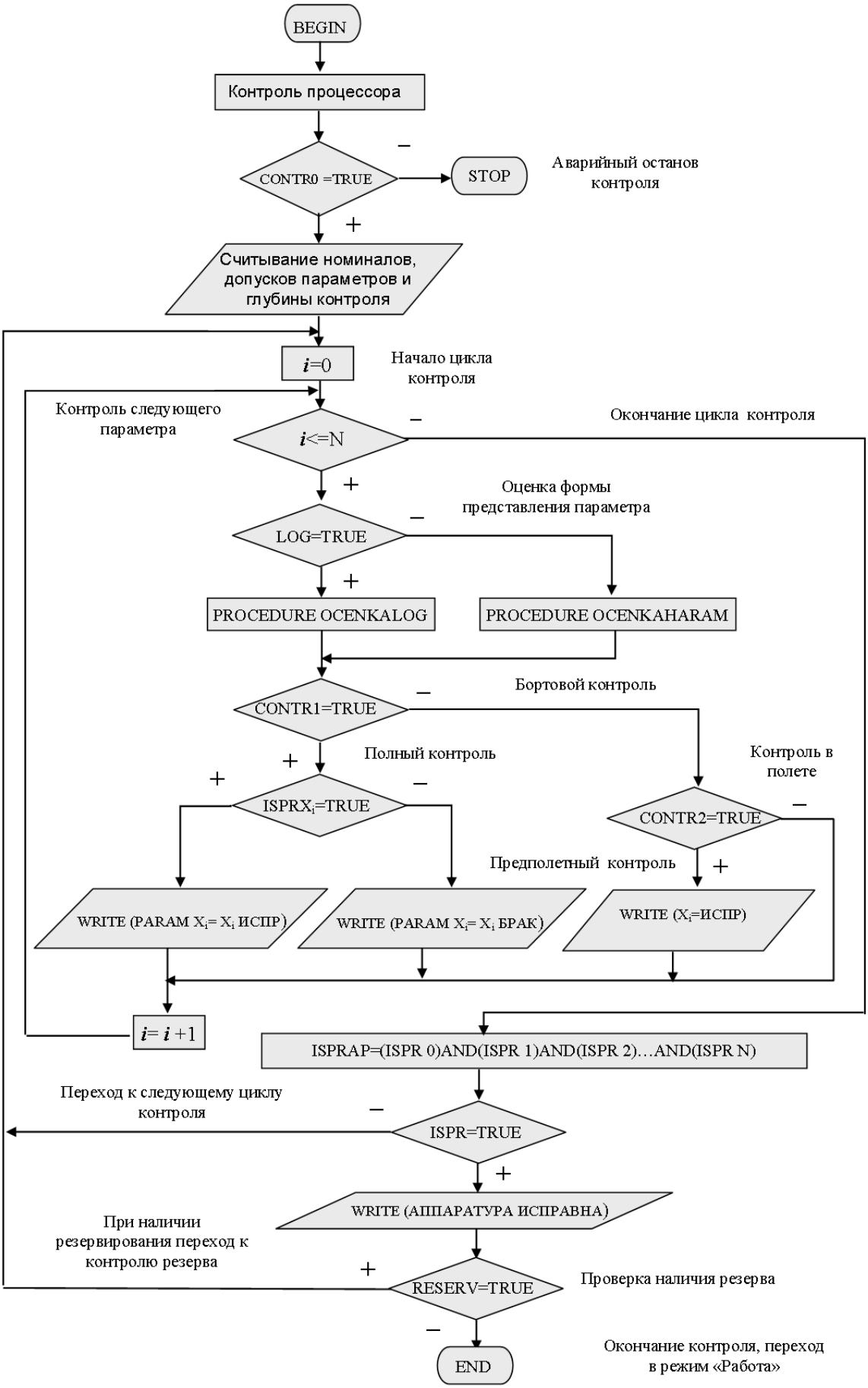


Рис. 6. Структурная схема процедуры АВСК.

Выводы

Применение средств вычислительной техники и современных информационных технологий позволяет организовать гибкую многоуровневую систему контроля параметров радиоэлектронной аппаратуры на стадии серийного производства, обеспечивает повышение достоверности результатов контроля и минимизацию влияния человеческого фактора.

В процессе эксплуатации бортовой радиоэлектронной аппаратуры широко применяются элементы встроенного контроля. Применение полного контроля АВСК целесообразно при проведении входного контроля и регламентных работ без привлечения дополнительного оборудования. Наличие в системе много-функционального индикатора знакографической информации позволяет выводить результаты контроля на его экран, что исключает необходимость использования дополнительных контрольно-измерительных приборов.

Применение АВСК в режиме предполетного контроля обеспечивает процесс отбраковки изделий, которые должны использоваться в полете. При наличии АВСК в системах с резервированием основных функциональных узлов и блоков целесообразно использовать его сигналы для автоматической реконфигурации системы, а применение АВСК для контроля в полете обеспечивает отбраковку изделий непосредственно перед их применением.

Литература

1. Сухачев А.Б. Организация встроенного контроля аппаратуры с применением средств микропроцессорной техники // Техника средств связи. Серия Техника телевидения. Вып. 4. – М., 1990. – С. 26-34.
2. Домарёнок Н.И., Собчук Н.С. Физические основы диагностики и неразрушающего контроля качества МЭА. – Мн., 2001.
3. Дзядковский В.П, Дудко В.К., Перчаткин Н.А., Сачков А.В., Селявский Т.В., Сухачев А.Б., Чирятников А.В., Шапиро Б.Л. Некоторые вопросы создания специализированного технологического оборудования для организации серийного производства тепловизионной аппаратуры нового поколения // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. Вып. 1. – М., 2014. – С. 34-37.

УДК 621.397.13

Сагдуллаев Ю.С., д.т.н., проф.
Ковин С.Д., к.т.н.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ РАЗНОСПЕКТРАЛЬНЫХ СИСТЕМ АВИАЦИОННОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Рассматриваются вопросы, связанные с информационными аспектами построения разноспектральных систем авиационного телевидения. Проводится их классификация, выделяются особенности и разновидности разноспектральных изображений, показывается роль информационных признаков и вероятностные ситуации обнаружения и селекции объектов, с использованием различных спектральных участков (зон) регистрации лучистого (светового) потока.

Введение

Как известно, системы прикладного телевидения включают в себя большое число видеоинформационных систем [1, 2]. Их различие между собой определяется спектральными участками (зонами) регистрации лучистого (светового) потока, удаленностью наблюдаемых объектов в пространстве, состоянием дистанционной среды, местом расположения передающих телевизионных (ТВ) или тепловизионных (ТПВ) камер.

Каждая ТВ-система в своей основе может быть специализированной или многофункциональной. По назначению и виду формируемой видеоинформации, такие системы могут предназначаться для визуального или автоматического анализа изображений наблюдаемого пространства, быть информационно-измерительными системами, а также системами для автоматического управления другими устройствами и т.д.

Ниже показаны особенности информационных аспектов построения разноспектральных систем телевидения и формирования сигналов изображений на основе преобразования отраженного или излученного лучистого (светового) потока в различных участках (зонах) оптического спектра, а также роль информационных признаков в обнаружении, различении и идентификации объектов в разноспектральных изображениях и др.

Классификация разноспектральных систем телевидения

Классификацию разноспектральных систем телевидения можно осуществить с привлечением различных показателей и параметров. Так, например, разноспектральные системы телевидения могут быть одноканальными, двухканальными или многоканальными. По принципу работы они могут быть оптико-механическими, электронными, покадровыми и др. С точки зрения формирования и передачи видеосигналов они могут быть:

– последовательными;
– одновременными;
– последовательно-одновременными.

На рисунке 1 показана классификация разноспектральных ТВ-систем по схеме входного звена, способов формирования и передачи сигналов. Последовательные системы строятся по одноканальной схеме, а одновременные системы по двухканальной или многоканальной схеме преобразования лучистого (светового) потока [3] и передачи видеосигналов.

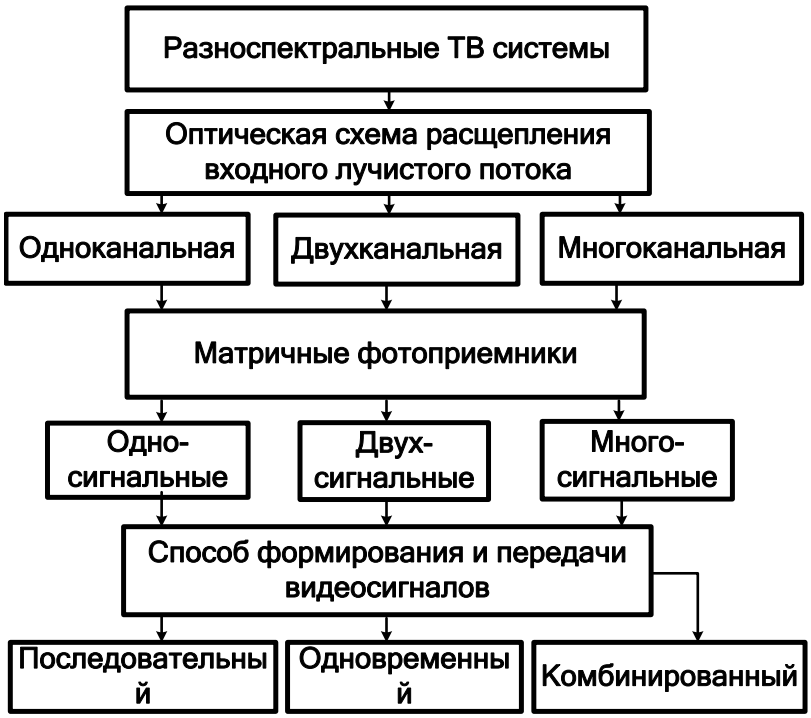


Рис. 1. Классификация разноспектральных ТВ-систем по схеме входного звена, способа формирования и передачи сигналов.

В одноканальных системах формирование видеосигналов происходит последовательно во времени. Для двухканальных и многоканальных систем формирование *m*-видеосигналов происходит одновременно по нескольким

каналам обработки данных. Передача таких сигналов на дальние расстояния требует более широкополосных каналов связи.

В этом плане минимизация числа используемых зон регистрации лучистого (светового) потока и их одновременная передача по каналам связи имеют большое значение для систем, осуществляющих формирование разноспектральных сигналов изображений. Преимущества одноканальных последовательных систем по сравнению с многоканальными одновременными системами следующие:

- один фотоприемник лучистого (светового) потока;
- необходимая полоса частот канала связи для передачи видеосигналов в m раз меньше;
- меньшие габаритно-весовые показатели передающей камеры;
- меньшая потребляемая мощность от источника питания.

Недостатки последовательных систем:

- видеосигналы формируются и передаются последовательно во времени;
- время передачи всех видеосигналов увеличивается в m раз;
- необходимость изменения спектральной характеристики оптического фильтра (механическим или электрическим путем).

Выбор той или иной схемы построения разноспектральной ТВ-системы будет диктоваться условиями наблюдения и анализа объектов окружающего пространства, режимом их работы и другими факторами.

Виды и особенности разноспектральных изображений

Наблюдаемые объекты разноспектральных оптических изображений (ОИ) можно представить в виде некоторого множества классов объектов:

$$N = \{A, B, C, \ldots F, \ldots, W\}_{\Delta\lambda j}, \qquad (1)$$

где каждый класс объектов $A, \ldots, W$ может включать некоторое их множество.

Под разноспектральными ОИ будем понимать изображения [2, 3], получаемые путем регистрации лучистого (светового) потока в некотором множестве зон (участков) регистрации $\{M\}$, а именно

$$M = \{\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \ldots, \Delta\lambda_j, \ldots, \Delta\lambda_m\}, \qquad (2)$$

где m – число зон (участков) регистрации лучистого (светового) потока в ультрафиолетовой (УФ), видимой (ВИ) и инфракрасной (ИК) областях спектра.

На рисунке 2 показаны разновидности разноспектральных изображений. Для формирования сигналов разноспектральных изображений требуются соответствующие передающие ТВ-камеры, стационарные или мобильные. При этом они могут осуществлять формирование двумерных, объемных или многоракурсных разноспектральных изображений. Такие камеры могут отличаться между собой по разрешению, чувствительности, отношению сигнал/шум, габаритам и весовым показателям, энергопитанию и т.д.

Согласование входных звеньев разноспектральных ТВ-камер с объектами наблюдения по пространственным признакам зависит от многих факторов. Среди них – разрешающая способность матричных фотоприемников (МФП), фокусное расстояние объектива, которое может быть постоянным или переменным, иметь определенную светосилу [3] и т.д.

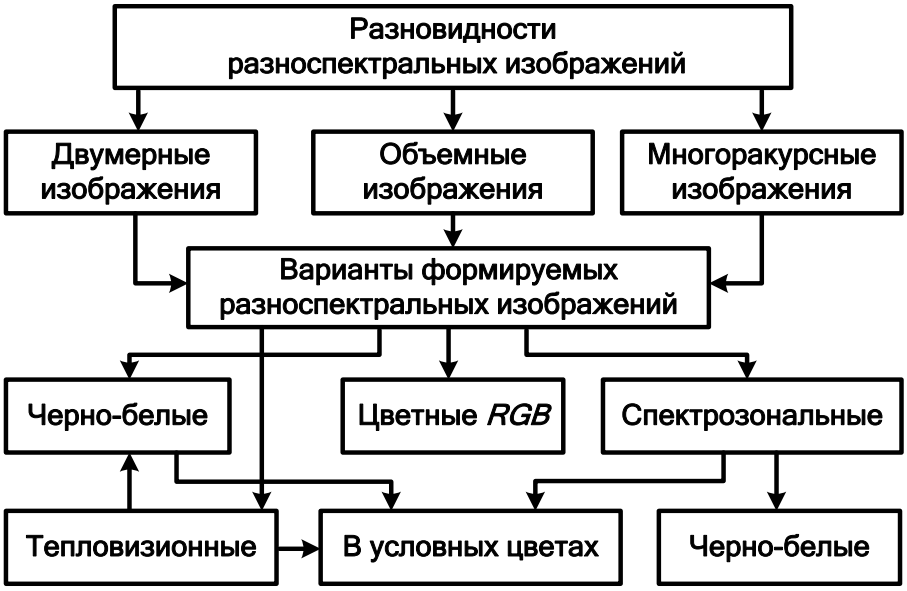


Рис. 2. Разновидности формируемых разноспектральных изображений.

Согласование входных звеньев разноспектральных ТВ-камер с объектами наблюдения по спектрально-энергетическим признакам определяется выбором спектральных участков (зон) регистрации лучистого потока, спектральными характеристиками расщепляющих устройств, оптических фильтров и преобразователей «лучистый (световой) поток – сигнал». В таблице 1 приведены основные типы передающих камер (источников видеосигналов)

различающие между собой спектральными участками (зонами) регистрации лучистого (светового) потока и их числом.

С помощью таких камер можно сформировать разноспектральные ТВ- и ТПВ-изображения для визуального и автоматического анализа оптических изображений. Исходя из числа спектральных участков (зон) регистрации лучистого (светового) потока, все источники видеосигналов, использующие ТВ-способ развертки изображений и МФП, можно условно разделить на три класса систем формирования сигналов разноспектральных изображений в ультрафиолетовой (УФ), видимой (ВИ) и инфракрасной (ИК) областях спектра:

- одноканальные системы, при числе участков регистрации $m = 1$;
- двухканальные системы, при числе участков (зон) регистрации $m = 2$;
- многоканальные системы, при числе зон регистрации $m \geq 3$.

В соответствии с таблицей 1, разноспектральные ТВ системы, имеющие один спектральный участок (зону) регистрации лучистого (светового) потока относятся к одноканальным системам, осуществляющим формирование сигнала одного разноспектрального изображения (п. 1-4).

Таблица 1. Разновидности разноспектральных передающих камер.

№ n/n	**Передающие камеры**	**Область спектра, мкм**	**Число участков (зон) регистрации**	**Формируемые разноспектральные изображения**
1	Ультрафиолетовая	0,23–0,37	m=1	Черно-белые, раскрашенные
2	Монохромная	0,38–0,76		
3	Инфракрасная	0,77–2,5		
4	Тепловизионные	3–5, 8–12		
5	Разноспектральные	0,23–12,0	$m \geq 2$	Черно-белые, в реальных и условных цветах
5.1	Цветная *RGB*	0,38–0,76	m=3	В реальных цветах
5.2	УФ	0,23–0,37	$2 \leq m \leq B$	Черно-белые, в условных цветах
5.3	ВИ	0,38–0,76	$2 \leq m \leq P$	
5.4	ИК	0,77–2,5	$2 \leq m \leq C$	
5.5	ТПВ	3–5	$2 \leq m \leq D$	
5.6		8–12	$2 \leq m \leq S$	

Разноспектральные ТВ-системы, осуществляющие регистрацию лучистого потока в нескольких спектральных участках (зонах), относятся к

двухканальным и многоканальным системам (п. 5), и обеспечивают формирование двух и более сигналов разноспектральных изображений.

При этом формируемая видеоинформация может быть двумерной или объемной и отображаться:

- в черно-белом виде (для монохромных, ТПВ- и разноспектральных изображений);
- в цветном варианте в естественных цветах (для цветных ТВ-изображений формата *RGB*);
- в цветном варианте и условных цветах (для разноспектральных ТВ-изображений, черно-белых ТВ- и ТПВ-изображений путем их раскрашивания).

Следует отметить, что при формировании изображений наблюдаемых объектов в условных цветах происходит их «раскрашивание». Для реализации этого, амплитуда входного сигнала черно-белого изображения может делиться, например, на несколько уровней, каждый из которых поступает на свой *RGB* вход монитора.

Как показывает практика, область применения таких систем и само прикладное телевидение включает большое число разнообразных самостоятельных видеоинформационных систем, отражающих целевой характер их использования. Здесь можно выделить следующие основные разновидности: космическое телевидение, авиационное телевидение, промышленное телевидение, охранное телевидение и другие системы. В последние годы широкое распространение получает использование систем разноспектрального телевидения для решения измерительных и управляющих задач в различных областях науки и техники.

Информационные признаки разноспектральных изображений

Основными информационными признаками разноспектральных ОИ являются их исходные спектрально-энергетические признаки (СЭП), пространственные признаки (ПП), а также некоторые динамические (дополнительные) признаки (ДП) объектов, включающие в общем случае:

- СЭП объектов, которые отражают яркость, цветовой тон, насыщенность цвета, яркостную, цветовую и тепловую контрастности изображений и т.д.;
- ПП объектов, которые отражают размер, форму, конфигурацию и др.;

– ДП объектов, отражающие их координаты, дальность положения, скорость движения и т.д.

Представим СЭП каждого i-объекта $\{N\}$ в виде некоторого множества отдельных признаков и параметров, например, в виде

$$X_i(t)=\{B_o(\lambda),\lambda,p,a,\ldots,d\}_{\Delta\lambda j}, \quad (3)$$

где: $B_o(\lambda)$ – яркость, λ – длина волны (цвет), p-насыщенность цвета ($0\leq p \leq 1$), a – число градаций яркости, d – другой СЭП.

ПП каждого i-объекта $\{N\}$ могут быть представлены в виде некоторого множества отдельных признаков и параметров

$$Y_i(t)=\{L,\Phi,\ldots,b\}_{\Delta\lambda j}, \quad (4)$$

где: L – линейный размер; Φ – форма; b – другой ПП.

Для ДП каждого i-объекта из их $\{N\}$ в виде некоторого множества отдельных признаков и параметров

$$Z_i(t)=\{R, v, x, y, z,\ldots,p\}_{\Delta\lambda j}, \quad (5)$$

где: R– расстояние; v – скорость движения; x, y, z – координаты; p – другой ДП.

На рисунке 3 показаны основные информационные признаки разноспектральных ОИ, которые могут формироваться за счет регистрации лучистого (светового) потока в различных участках оптического спектра. При этом следует отметить, что для зрительного восприятия исходных оптических или сформированных изображений, с использованием систем телевидения, доминирующая роль отводится СЭП объектов.

Каждый i-объект $\{N\}$ может характеризоваться определенными признаками и параметрами (4), (5), (6) из их некоторого множества $\{X_i(t)\}$, $\{Y_i(t)\}$, $\{Z_i(t)\}$ в j-зоне регистрации лучистого (светового) потока. Они определяют его содержание следующим образом

$$X_i(t)_{\Delta\lambda j}=\{X_1, X_2,\ldots,X_w\}_t,\ Y_i(t)_{\Delta\lambda j}=\{Y_1,Y_2,\ldots,Y_w\}_t,\ Z(t)_{\Delta\lambda j}=\{Z_1,Z_2,\ldots,Z_w\}_t,$$

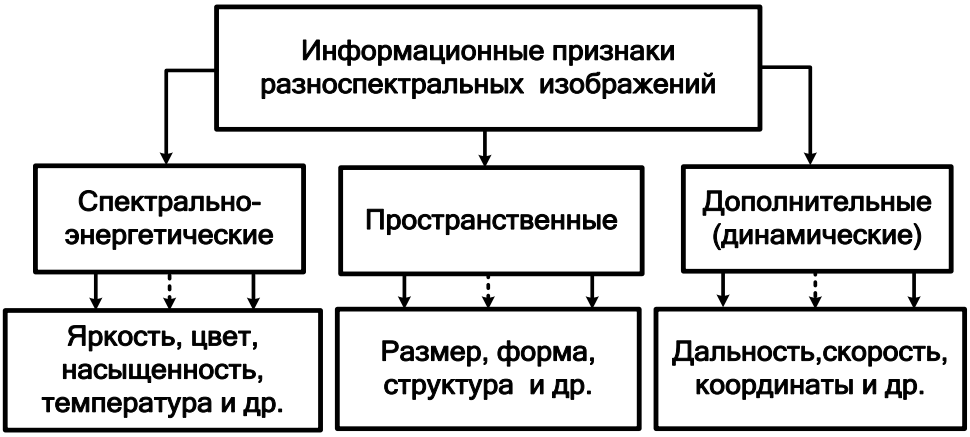


Рис. 3. Информационные признаки разноспектральных изображений.

Для одинаковых объектов, разнесенных в пространстве и содержащихся в ОИ для *j*-зоны регистрации лучистого (светового) потока, выполняется условие, при котором обеспечивается равенство значений СЭП, ПП и ДП, то есть, например

$$X_i=X_{(i+1)},\ Y_i=Y_{(i+1)},\ Z_i=Z_{(i+1)}.$$

Для разных объектов могут быть другие ситуации, когда

$$X_i=X_{(i+1)},\ Y_i\neq Y_{(i+1)},\ Z_i=Z_{(i+1)},\ X_i\neq X_{(i+1)},\ Y_i=Y_{(i+1)},\ Z_i=Z_{(i+1)} \text{ и т.д.}$$

На рисунке 4, для примера, показано представление информационного вектора для *i*-объекта ОИ в *j*-зоне регистрации лучистого (светового) потока на основе указанных признаков в виде куба. Для идентификации *i*-объекта из их некоторого множества$\{N\}$, необходимо вычислить его информационный вектор $J_i(N)_t$, описывающий принадлежность данного объекта к определенному классу объектов. Процедура, отражающая этап принятия решения при отнесении *i*-объекта $\{N\}$ к тому или иному классу, называется решающей функцией. Далее можно провести некоторую детализацию рассмотренных информационных признаков $X(N)$, где СЭП представлены в виде двух отдельных самостоятельных составляющих:

– яркостных признаков (B), включающих диапазон яркостей от B_{min} до B_{max};
– цветовых (спектральных) признаков, определяемых доминирующей длиной волны (λ) в спектральном участке длин волн от λ_{min} до λ_{max}.

Таким образом, рассмотренные информационные признаки, в первую очередь, определяют способность обнаружения, различения и идентификации объектов $R(t)_{\Delta\lambda j}$ при анализе изображений, что можно представить в виде некоторого функционала

$$R(t)_{\Delta\lambda j} = F(B, \lambda, Y, Z). \qquad (6)$$

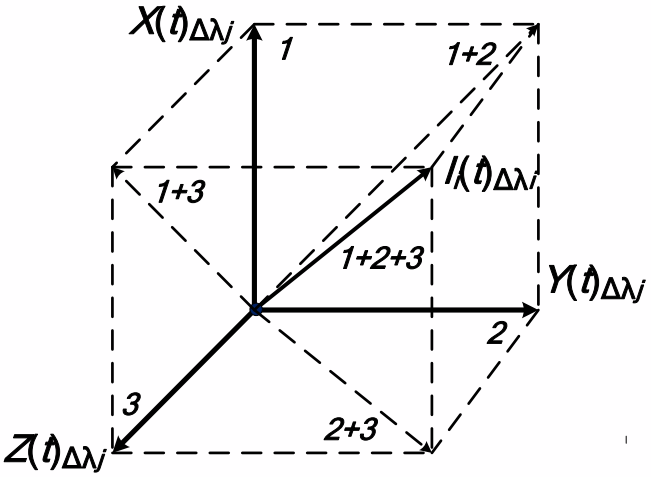


Рис. 4. Представление информационного вектора для *i*-объекта в *j*-зоне регистрации лучистого потока.

При этом могут быть использованы отдельные информационные признаки или их сочетания для *j*-зоны регистрации лучистого (светового) потока, например, вида

$$R(t)_{\Delta\lambda j} = F(B),\ R(t)_{\Delta\lambda j} = F(B,\lambda),\ldots,R(t)_{\Delta\lambda j} = F(B,\lambda,Z\ ). \qquad (7)$$

Таблица 2. Используемые информационные признаки для анализа изображений.

№ n/n	**Варианты используемых информационных признаков для обнаружения, различения и идентификации объектов**			
	СЭП, $X(t)_{\Delta\lambda j}$		ПП, $Y(t)_{\Delta\lambda j}$	ДП, $Z(t)_{\Delta\lambda j}$
	Яркостные	Спектральные	Размер, форма и др.	Скорость и др.
1	+	–	–	–
2	+	–	+	–
3	+	–	–	+
4	+	–	+	+
5	+	+	–	–
6	+	+	+	–
7	+	+	–	+
8	+	+	+	+

Рассмотренные информационные признаки и их сочетания, которые можно использовать для решения задач обнаружения, различения и идентификации (анализа) объектов, представлены в таблице 2.

Отдельные признаки могут быть в изображениях при формировании черно-белых (монохромных) или цветных (разноспектральных) изображений, получаемых путем регистрации светового (лучистого) потока в различных участках (зонах) оптического спектра. На рисунке 5 показано взаимодействие информационных признаков при распознавании (обнаружении, различении и идентификации) объектов.

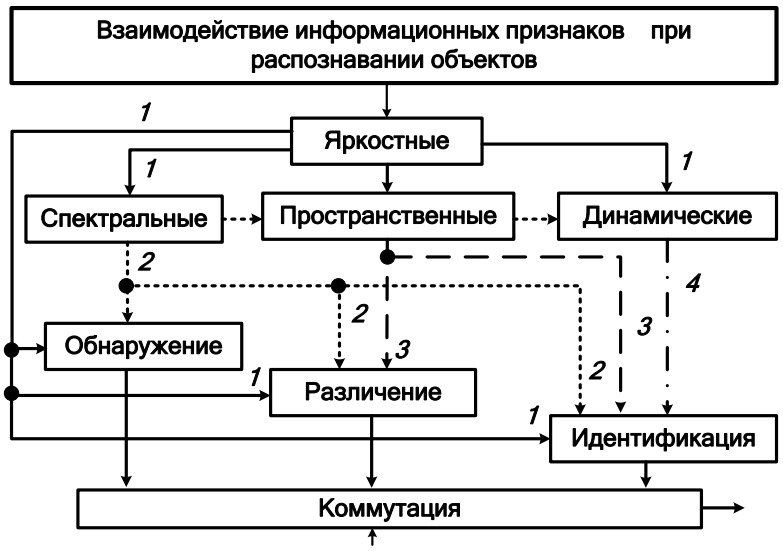


Рис. 5. Взаимодействие информационных признаков при распознавании объектов.

Роль СЭП в распознавании объектов

Возможность регистрации минимального количества лучистого (светового) потока, излученного (отраженного) от объектов уже может порождать достаточное количество пространственной информации об объектах наблюдения в ТВ-изображениях [3]. При этом, в таких изображениях существует зависимость ПП от СЭП. Восприятие и анализ изображений всегда определяется значениями СЭП, то есть $Y_i=f(X_i)$.

В таблице 3 показаны, какие информационные признаки должны (могут) быть использованы в процессах обнаружения, различения и идентификации объектов в разноспектральных ОИ.

Таблица 3. Информационные признаки в задачах анализа изображений.

№ n/n	Уровень распознавания объектов	Используемые информационные признаки объектов		
		СЭП	ПП	ДП
1	Обнаружение	+	–	–
2	Различение	+	+	–
3	Идентификация (классификация)	+	+	+

При решении задач обнаружения, различения и идентификации объектов в разноспектральных ОИ, роль и приоритет СЭП $\{X\}$ в общей распознавательной способности изображений будет определяющей при одинаковых значениях ПП для большинства наблюдаемых объектов, когда для них соблюдается условие, при котором $(Y_i – Y_j) \rightarrow 0$. Хотя такие объекты будут одинаковыми по ПП, но они могут различаться по СЭП. Это один из тех случаев, когда наглядно проявляется эффективность использования способов обнаружения и различения объектов по СЭП, казалось бы, одинаковых объектов по виду ПП в наблюдаемых ОИ.

Теперь рассмотрим роль ПП объектов в распознавании объектов. Как известно, наблюдение объекта, размер которого соответствует двум элементам ТВ-изображения, будет соответствовать уровню распознавания – обнаружению объекта с вероятностью 50 %, согласно критерию Джонсона [3]. В таблице 4 показан переход от чисел Джонсона к числу элементов в ТВ-растре, число которых должно быть в два раза больше.

Таблица 4. Уровень распознавания объектов и число необходимых ТВ-элементов.

Уровень распознавания объектов	Описание	Число ТВ элементов ΔZ_i		
		P=0,5	P=0,8	P=1,0
Обнаружение	Восприятие наличия объекта (да/нет)	2	3	6
Различение	Восприятие объекта как отдельного класса (автомобиля, самолета и т.д.)	8	12	24
Идентификация (классификация)	Опознание объектов внутри классов (тип легкового автомобиля и т.д.)	16	24	48

Вероятность различения объектов в разноспектральных изображениях

Ситуации обнаружения и различения объектов с использованием таких изображений могут быть описаны известными вероятностными положениями [4]. Если принять, что $P_в$ – вероятность получения информации на выходе системы для обнаружения и селекции объекта, $P_н$ – вероятность различия объектов между собой по спектрально-энергетическим признакам, $P'_в$ – вероятность получения информации о различии объектов при их отсутствии, то вероятность обнаружения и селекции объектов распределится следующим образом.

1. Для наблюдаемого пространства имеется различие объектов по СЭП. В этом случае вероятность правильного выделения объектов равно величине $P_{прав.выд.} = P_в \cdot P_н$, а вероятность невыделения объектов равна величине $P_{нев} = (1 – P_в) \cdot P_н$.
2. Для наблюдаемого пространства не имеется различия объектов по СЭП. В этом случае вероятность правильного невыделения объектов равна величине $P_{прав.невыд.} = (1 – P'_в) \cdot (1 – P_н)$, а вероятность неправильного выделения объектов равна величине $P_{неп.выд.} = P'_в(1 – P_н)$.

В случае, если для обнаружения и селекции объектов используются одновременно две системы – ТВ и ТПВ, вероятность обнаружения объектов некоторого $\{N\}$ с использованием ТВ-системы составит величину $P_{о(тв)}$, а с использованием ТПВ системы составит величину $P_{о(тпв)}$, тогда, используя известное выражение для определения вероятности двух независимых событий [2], можно представить общую вероятность обнаружения объектов некоторого $\{N\}$ с использованием таких систем в виде

$$P_{о\Sigma} = P_{о(тв)} + P_{о(тпв)} – (P_{о(тв)} \cdot P_{о(тпв)}). \qquad (8)$$

Если обозначить приращение (увеличение) вероятности обнаружения объектов через величину $\Delta P_{о\Sigma}$, тогда используя (1), можно определить, что $\Delta P_{о\Sigma} \rightarrow max$, когда $P_{о(тв)} = P_{о(тпв)} = 0{,}5$ (рисунок 6).

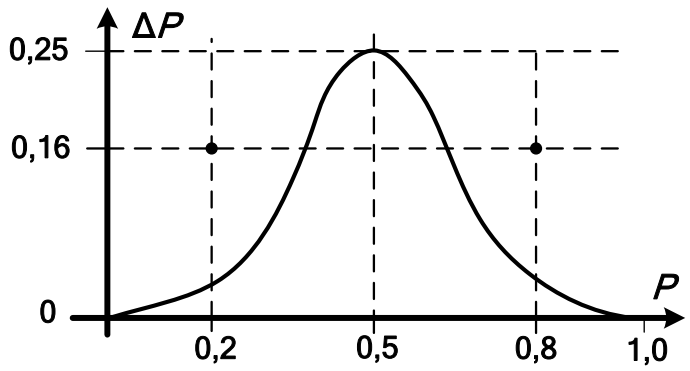


Рис. 6. Приращение вероятности обнаружения объектов при использовании двух разноспектральных изображений.

Пусть имеется некоторое число разноспектральных систем, осуществляющих регистрацию лучистого потока в m-спектральных участках (зонах), а вероятность получения информации о различии объектов в каждом спектральном участке (зоне) равна величине p. Требуется определить необходимое число таких систем и, соответственно, число зон регистрации m для различения объектов с заданной вероятностью $P_о$.

Вероятность неразличения объектов при использовании одной системы или, соответственно, одного спектрального участка (зоны) регистрации лучистого (светового) потока равна величине

$$P'_н=(1-p), \tag{9}$$

а при использовании m–систем (зон регистрации) составит величину

$$P'_н =(1-p)^m. \tag{10}$$

Выражение (3) показывает, что с увеличением числа используемых систем (или зон регистрации) вероятность неразличения объектов уменьшается. Вероятность различения (выделения) объектов с использованием m–систем (зон регистрации) составит величину

$$P_в= 1-P'_н =[1-(1-p)^m]. \tag{11}$$

Если в каждой i-системе или i-зоне регистрации будет своя вероятность различения (выделения) объектов в виде $p_1,\ldots p_i,\ldots,p_m$. Тогда выражение (10) можно представить в виде:

$$P'_{нi}=(1-p_i). \qquad (12)$$

Для всех *m*–систем (или для *m*–зон регистрации для одной системы) вероятность не различения объектов составит величину

$$P'_н=(1-p_1)\cdot(1-p_2),\ldots,(1-p_i),\ldots,(1-p_m) = \prod_{i=1}^{m}(1-p_i) \qquad (13)$$

Вероятность различения (выделения) объектов с использованием *m*-систем (или *m*-зон регистрации для одной системы) при различных вероятностях различения в *i*-системе или *i*-зоне составит величину

$$P_в= 1-\prod_{i=1}^{m}(1-p_i)\ . \qquad (14)$$

В таблице 5 приводятся расчетные данные по увеличению вероятности селекции (выделения) объектов в разноспектральных (многоканальных) системах телевидения за счет привлечения дополнительных зон регистрации лучистого потока, когда *m*=2, 3, 4 и 5 [3]. При этом вероятность получения информации о различии объектов в каждой отдельной зоне регистрации принималась равной величине *p*=0,1; *p*=0,25 или *p*=0,5.

Таблица 5. Зависимость вероятности различения объектов от числа зон регистрации.

№ n/n	**Используемое число зон регистрации, *m***	**Увеличение вероятности различения (выделения) объектов с использованием *m*– зон регистрации**		
		$P_в$		
1	*1*	0,100	0,250	0,500
2	*2*	0,190	0,493	0,750
3	*3*	0,271	0,437	0,875
4	*4*	0,344	0,578	0,925
5	*5*	0,409	0,635	0,965
Выигрыш, *V*		4,0	2,54	1,93

На рисунке 7 показана вероятность различения (выделения) объектов с использованием *m*-систем или *m*-зон регистрации в одной системе.

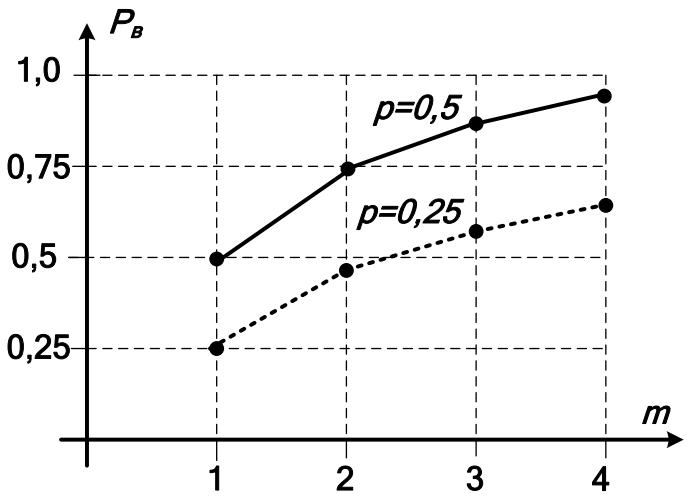


Рис. 7. Вероятность различения (выделения) объектов при совместном использовании *m*-систем или *m*-зон регистрации в одной системе.

На рисунке 8, в соответствие с таблицей 5, показан выигрыш в возможном увеличении вероятности различения (выделения) объектов при использовании пяти зон регистрации к исходной одной, у которой вероятность обнаружения объектов условно равна величине p=0,1; p=0,25 и p=0,5.

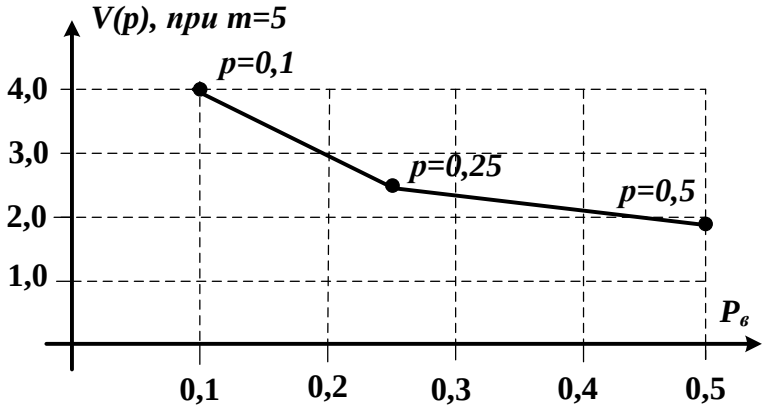


Рис. 8. Выигрыш в увеличении вероятности обнаружения объектов при пяти зонах регистрации.

Анализ возможных ситуаций показывает, что достоверность обнаружения и селекции объектов некоторого множества $\{N\}$ зависит от многих факторов, среди них наличие тех или иных объектов в наблюдаемом пространстве, исходная вероятность их различия по интенсивности отраженного или излученного лучистого потока в отдельной зоне регистрации и т.д.

Заключение

Применение разноспектральных систем обеспечивает решение широкого круга задач по анализу изображений, по сравнению с теми задачами, которые может решать человек, используя зрительное восприятие ОИ только в ВИ-области спектра. В целом разноспектральные системы телевидения можно разделить на два больших класса, которые в своей основе используют интегральные и дифференциальные методы регистрации лучистого (светового) потока в спектральном участке длин волн от λ_1 до λ_n, куда могут входить УФ, ВИ- и ИК-области спектра.

В первом случае регистрация лучистого потока может осуществляться в широком спектральном участке длин волн УФ-, ВИ- и ИК-областей спектра, например, $(\lambda_n–\lambda_1)$=0,37–0,23=0,14 мкм, 0,76–0,38=0,38 мкм,…, 12–8,0=4,0 мкм. При этом МФП охватывают тот или иной спектральный участок. Во втором случае регистрация лучистого потока осуществляется внутри спектральных участков УФ-, ВИ- и ИК-областей спектра, в нескольких зонах регистрации лучистого потока $\Delta\lambda_1,\ldots,\Delta\lambda_i,\ldots,\Delta\lambda_m$. Для этого случая, лучистый поток каждой зоны регистрации $\Delta\lambda_i$ с использованием МФП, одновременно или последовательно, преобразуют в зональные сигналы изображений.

Проведенный, с вероятностных позиций, анализ ситуаций показывает, что достоверность обнаружения и селекции объектов некоторого множества $\{N\}$ зависит от ряда факторов. При малых вероятностях обнаружения и селекции объектов в отдельных разноспектральных изображениях, увеличение числа зон регистрации до величины $m \leq 6$ позволит повысить общую их вероятность обнаружения. Вместе с тем, при высокой вероятности обнаружения и селекции объектов в отдельных разноспектральных изображениях не требуется чрезмерного увеличения числа зон регистрации для выбранного спектрального участка.

Для решения задач визуального, а также автоматического анализа разноспектральной информации оптимальное число зон регистрации лучистого потока и преобразования его в зональные сигналы изображения может находиться в диапазоне величин $2 \leq m \leq 6$.

Литература

1. Сагдуллаев Ю.С. Вещательное и прикладное телевидение. Вчера, сегодня, завтра. Журнал Техника средств связи. Серия техника телевидения. – М., 2015. – С. 20-25
2. Ковин С. Д., Сагдуллаев Ю. С., Галиев А. Л. Телевизионные датчики для визуального анализа объектов земной поверхности. Журнал промышленные АСУ и контроллеры. № 9. – М., 2014. – С. 68-71.
3. Сагдуллаев Ю.С., Ковин С. Д. Восприятие и анализ разноспектральных изображений. – М., 2016. – 251 с.
4. Румшинский Л.З. Элементы теории вероятностей, изд. 5 перераб. Главная редакция физико-математической литературы. – М., 1976.

УДК 621.397.13

Ковин С.Д., к.т.н.
Сагдуллаев Ю.С., д.т.н., проф.

ВЫБОР ЗОН РЕГИСТРАЦИИ В РАЗНОСПЕКТРАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ АВИАЦИОННОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Рассматриваются вопросы, связанные с выбором зон регистрации лучистого потока для формирования разноспектральных изображений в системах авиационного телевидения.

Введение

Одним из направлений современного развития систем прикладного телевидения является более полный учет спектральных «цветовых» признаков объектов при выборе входного звена разноспектральных систем телевидения, например, предназначенных для пилотируемых, а также беспилотных летательных аппаратов (БЛА или БПЛА).

Основная идея спектральной селекции объектов в оптических изображениях базируется на регистрации отраженного или излученного лучистого потока в нескольких спектральных зонах (участках) $\Delta\lambda_i$, располагаемых внутри широкого спектрального участка от λ_1 до λ_n. При этом в

зависимости от решаемой задачи число зон регистрации может быть различным. Использование разноспектральных систем телевидения в авиации, когда высота полета самолета или БЛА в несколько десятков и даже сотен раз меньше по сравнению с высотой полета различных космических аппаратов (КА), даст более существенный результат при выполнении дистанционного зондирования объектов земной поверхности по сравнению с космическим зондированием.

Как известно, цветная телевизионная (ТВ) камера осуществляет регистрацию отраженного светового потока в трех участках (зонах) видимой области спектра (0,38–0,76 мкм) – красной, зеленой и синей. Эти области спектра согласованы со спектральной характеристикой зрительной системы человека. Разноспектральная ТВ-камера может осуществлять регистрацию отраженного лучистого (светового) потока в двух и более зонах ультрафиолетовой (УФ), видимой (ВИ) и инфракрасной (ИК) областях спектра, которые не согласованы со спектральной характеристикой зрительной системы человека [1].

При хорошей прозрачности дистанционной среды в дневное время цветные (*RGB)* ТВ-камеры обеспечивают более высокую вероятность обнаружения и распознавания целей, формируя изображения в цветах, привычных для глаз человека-оператора. С другой стороны, при наличии в атмосфере пыли, дымов и аэрозольных частиц, для повышения контрастности изображений целесообразно регистрировать лучистый поток в ближней ИК-области спектра [2].

Имеется ряд работ, где подробно описаны достоинства ближней ИК-области спектра (1,0-2,5 мкм) для ведения наблюдения в ночное время суток, к которым относятся: высокий уровень естественной ночной освещенности на длине волны λ=1,6 мкм, высокий уровень контраста цели, повышенная прозрачность атмосферы и ряд других факторов. Следует отметить, что в диапазоне длин волн 1,4-1,7 мкм существенно повышается прозрачность атмосферы и, более чем на порядок (по сравнению с видимой областью спектра), снижается яркость атмосферной дымки [2, 3]. Поэтому лучистый поток в этом диапазоне длин волн проходит лучше через некоторые виды дымов, пыль и туман, что позволяет обеспечить большую вероятность обнаружения, селекции и идентификации объектов.

Известно также, что почти вся (99,9 %) пришедшая от Солнца на земную поверхность лучистая энергия приходится на спектральный интервал от 0,3 до 3,0 мкм с преобладанием в видимой области спектра (максимум около 0,55 мкм). Земля, накопив солнечную энергию, сама становится источником излучения в интервале длин волн λ=3,0-40 мкм с максимумом в диапазоне λ= 8-12 мкм [4].

Атмосфера значительно ослабляет и спектрально преобразует солнечное излучение вследствие рассеяния и поглощения молекулами газов, водяными парами, твердыми частицами. Таким образом, спектр излучения поверхности Земли имеет днем два максимума – один на длине волны около 0,55 мкм, обусловленный отраженной солнечной радиацией, и второй – на длине волны около 10,0 мкм, обусловленный собственным тепловым излучением Земли.

Освоение тепловой части ИК области спектра позволило создать различные виды тепловизоров, которые формируют тепловизионные (ТПВ) изображения подобно обычным ТВ-камерам, но используют для этого не видимый световой поток, а лучистый поток, излучаемый самими объектами (на основе имеющегося различия в распределении температуры объектов окружающей среды между собой).

Ночью спектр излучения земной поверхности изменяется, сохраняется только максимум в области собственного излучения, а в области отражения максимум исчезает. Диапазон 3,0-5,0 мкм характерен для регистрации излученного потока, например, при пожарах, поскольку это соответствует температуре горящих объектов.

Диапазон 8,0-12,0 мкм характерен для регистрации излученного лучистого потока нагретых (охлажденных) естественных объектов поверхности Земли или искусственных объектов, имеющих иную температуру по сравнению с фоновыми объектами [3].

Атмосфера Земли не является прозрачной во всех спектральных участках, поэтому большинство оптико-электронных и ТВ-систем дистанционного зондирования Земли работают в так называемых «окнах прозрачности» атмосферы: 0,4-1,0 мкм; 1,5–1,75 мкм; 3,0-5,0 мкм; 8,0-12,0 мкм и др. [2, 3].

В ближней ИК области спектра (1,0–2,5 мкм) имеются существенные различия характеристик излучения органических и неорганических материалов. Это позволяет разделить материалы подстилающей поверхности на классы и,

более того, идентифицировать типы почв, виды растительности, разделить неорганические материалы на металл, пластик, краску и т.п.

Кроме того, изображения в этой области спектра дают хорошие дискриминационные возможности для идентификации различных типов поверхностей в городской среде, включая асфальт, акриловые волокна, нейлон, пластмассу, различные краски, кожу человека и многое другое.

Как известно, путем сопоставления изображений, полученных в участках спектра 0,51-0,57 мкм и 0,74-0,92 мкм, можно отличить естественную растительность от искусственных зеленых объектов. Далее, здоровую растительность от пораженных болезнью, хвойные древесные породы от лиственных и др.

Анализ изображений, полученных в ВИ- и ближней ИК-области спектра, позволяет осуществлять контроль состояния заданных объектов. Дешифрируемость таких объектов как бетонированное шоссе, железнодорожные пути, реки и их притоки, береговая линия и тонкий прибрежный слой воды оказывается выше в ближней ИК-области спектра. В изображениях ВИ-области спектра лучше выделяются песчаные выемки, проселочные дороги, пешеходные дорожки и другие объекты [2].

Надо отметить, что отражательная способность снежной поверхности при длине волны больше 2,0 мкм практически равна нулю, в то же время отражательная способность облачного покрова всегда выше.

Процесс выбора зон регистрации лучистого потока

На рисунке 1 показан процесс выбора зон регистрации лучистого потока для формирования разноспектральных изображений с использованием систем телевидения [1, 2]. Этот процесс включает следующую последовательность основных операций:

- определение конечного класса объектов, масштаба съемки и пространственного разрешения системы;
- поиск информативных участков (зон) оптического спектра (в УФ, ВИ, ИК области);
- выбор информативных зон регистрации по спектральному контрасту для представленного сочетания объектов и их классов;
- анализ полученного числа зон регистрации и их применимости для реализации системы.

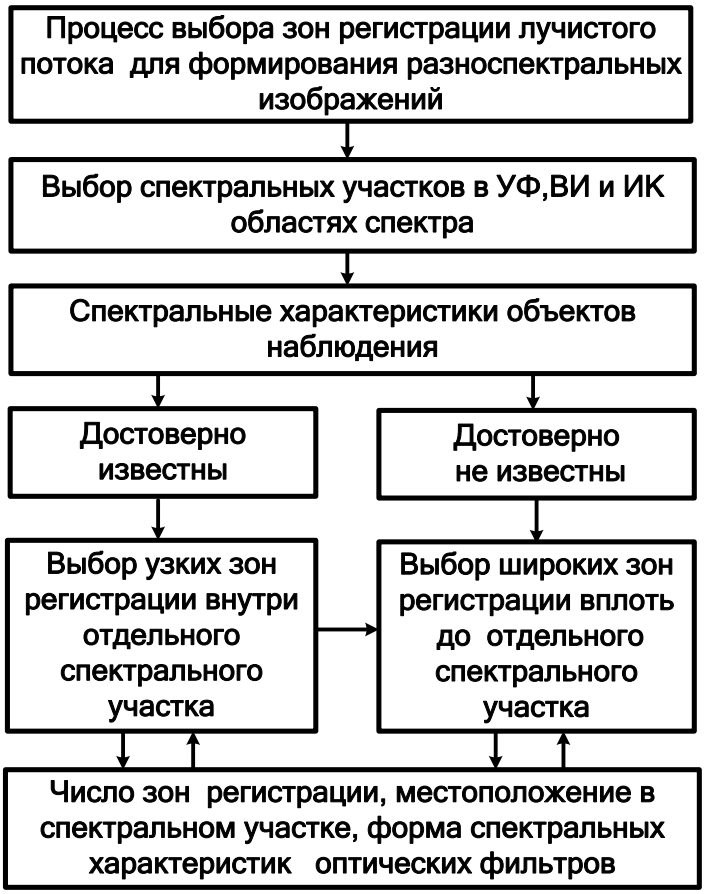


Рис. 1. Процесс выбора зон регистрации лучистого потока для формирования сигналов разноспектральных изображений.

Далее осуществляется процесс конкретизации рабочих зон регистрации лучистого потока, который включает:

– определение распределения вероятности появления и селекции различных сочетаний объектов;
– выбор ширины и местоположения каждой зоны регистрации;
– выбор спектральной характеристики (СХ) оптики, оптических фильтров (ОФ) и преобразователей «лучистый (световой) поток-сигнал»;
– выбор конечного числа зон регистрации;
– оценку приемлемости согласования входного звена системы с объектами селекции;
– минимизацию числа зон регистрации.

Минимизация числа зон регистрации лучистого потока направлена на выбор некоторого их числа из $\{M\}$, обеспечивающих максимальную вероятность различения и выделения объектов $\{N\}$. Она может быть

реализована, например, путем поочередного исключения одной зоны регистрации из некоторой группы зон до образования минимального числа зон регистрации лучистого (светового) потока.

Повышение эффективности спектральной селекции объектов с использованием разноспектральных систем телевидения связано с выбором наиболее информативных зон регистрации лучистого потока. Ниже рассмотрена детализация процесса выбора спектральных участков и зон регистрации лучистого потока для разноспектральных систем.

В качестве примера, на рисунке 2а показано распределение спектрально-энергетических характеристик двух произвольных объектов *A* и *B*, а на рисунках 2б и 2в – зависимости величин отношения сигнал/шум $\psi(\Delta\lambda)$ и контрастности объектов $k(\Delta\lambda)$ на выходе матричного фотоприемника (МФП) от ширины зоны регистрации $\Delta\lambda_i$.

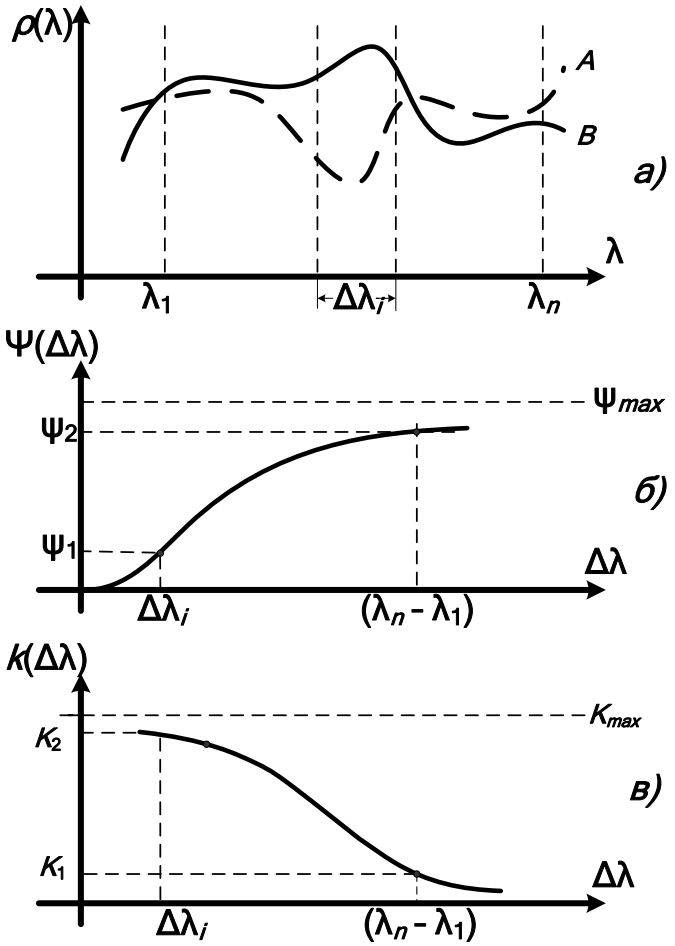


Рис. 2. Распределение спектрально-энергетических характеристик двух произвольных объектов (*а*), зависимости отношения сигнал/шум (*б*) и величины контраста (*в*) от ширины зоны регистрации.

Как видно из зависимостей спектрально-энергетических характеристик объектов на рисунке 2а, при уменьшении ширины зоны регистрации $\Delta\lambda_j$ контраст двух объектов по входному лучистому потоку может быть увеличен, но, при этом, отношение сигнал/шум будет уменьшаться, при увеличении ширины зоны регистрации ситуация оказывается обратной.

В этой связи, для выбора оптимальной ширины зоны регистрации лучистого потока и её местоположения в спектральном интервале могут быть использованы различные подходы. Одним из них является подход на основе критерия, учитывающего возможность достижения максимального значения произведения двух величин $\psi(\Delta\lambda)\cdot k(\Delta\lambda)$, то есть

$$\eta(\Delta\lambda)_{opt} = \psi(\Delta\lambda)\cdot k(\Delta\lambda) \rightarrow max. \qquad (1)$$

Применение разноспектральных ТВ-систем должно предусматривать увеличение количества получаемой видеоинформации и повышения её достоверности. При этом должно обеспечиваться формирование таких разноспектральных ТВ-изображений, в которых достигается выявление максимального числа объектов из исходных при визуальном восприятии изображений.

Для реализации этого, в первую очередь, следует обеспечить максимально возможный спектрально-энергетический контраст объектов по величине входного лучистого (светового) потока при приемлемом отношении сигнал/шум на выходе разноспектральных ТВ-систем. В этом случае правильный выбор спектральных зон (участков) регистрации лучистого потока и параметров систем будет учитывать степень согласованности входного звена с объектами наблюдения, а величина отношения сигнал/шум – оптимизацию системы в рамках принятой её структуры.

Способы выбора зон регистрации лучистого потока

Ниже рассматриваются способы выбора зон регистрации лучистого (светового) потока для разноспектральных систем авиационного телевидения. Общий лучистый поток можно представить в виде некоторого множества лучистых потоков УФ-, ВИ- и ИК-областей спектра

$$F(\lambda) = \{F_{уф}(\lambda), F_{ви}(\lambda), F_{ик1}(\lambda), F_{ик2}(\lambda), F_{ик3}(\lambda)\}. \qquad (2)$$

Если предположить, что УФ-область спектра имеет ширину равную величине $\Delta\lambda_{уф} = (\lambda_2 – \lambda_1)$, ВИ-область спектра характеризуется величиной $\Delta\lambda_{ви} = (\lambda_3 – \lambda_2)$, а ИК-область спектра имеет три поддиапазона, включающие

$$\Delta\lambda_{ик1} = (\lambda_4 – \lambda_3),\ \Delta\lambda_{ик2} = (\lambda_5 – \lambda_4) \text{ и } \Delta\lambda_{ик3} = (\lambda_6 – \lambda_5), \qquad (3)$$

тогда, общая ширина спектральных участков для регистрации отраженного $\Delta\lambda_{отр}$ и излученного лучистого потока $\Delta\lambda_{изл}$ составит величину

$$\Delta\lambda_{отр} = (\Delta\lambda_{уф} + \Delta\lambda_{ви} + \Delta\lambda_{ик1}),\ \Delta\lambda_{изл} = (\Delta\lambda_{ик2} + \Delta\lambda_{ик3}). \qquad (4)$$

В данных спектральных участках может быть расположено некоторое множество зон регистрации лучистого потока $\{M\}$

$$M = \{\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \ldots, \Delta\lambda_i, \ldots, \Delta\lambda_m\}. \qquad (5)$$

Значение ширины зоны регистрации лучистого потока может принимать различные значения от $\Delta\lambda_{min}$ до $\Delta\lambda_{max}$. Можно принять, что для любого спектрального участка, используемая ширина зоны регистрации $\Delta\lambda_i = \Delta\lambda_{max}$ характеризует случай, когда охватывается весь спектральный участок, например, ВИ- или ближний ИК-участки спектра. Для данного случая, общее число зон регистрации будет минимальным.

В таблице 1 показаны спектральные участки, длина волны, ширина участков и вид лучистого потока для формирования разноспектральных изображений.

Таблица 1. Спектральные участки, длина волны, ширина участков и вид лучистого потока для формирования разноспектральных изображений.

№ п/п	**Спектральный участок**	**Длина волны (мкм)**	**Ширина участка (мкм)**	**Вид лучистого потока**
1.	Ультрафиолетовый	0,25–0,37	0,12	$F_{уф}(\lambda)$ – отраженный
2.	Видимый	0,38–0,76	0,38	$F_{ви}(\lambda)$ – отраженный
3.	Инфракрасный (ИК$_1$)	0,77–2,50	1,73	$F_{ик1}(\lambda)$ – отраженный
4.	Инфракрасный (ИК$_2$)	3,0–5,0	2,0	$F_{ик2}(\lambda)$ – отраженный, излученный
5.	Инфракрасный (ИК$_3$)	8,0–12,0	4,0	$F_{ик3}(\lambda)$ – излученный

В работе [5] принято, что выбор регистрации лучистого потока в нескольких узких зонах внутри спектрального участка от λ_1 до λ_n представляет собой дифференциальный метод регистрации. Регистрация лучистого потока в более широких зонах спектрального участка названа интегральным методом.

При этом считается [5], что для узкой зоны регистрации отраженного лучистого (светового) потока по её ширине $\Delta\lambda_i$ должно выполняться условие

$$\Delta\lambda_i \leq \Delta\lambda_{УФ}/2,\ \Delta\lambda_i \leq \Delta\lambda_{ВИ}/3,\ \Delta\lambda_i \leq (\Delta\lambda_{ВИК})/4,\ \Delta\lambda_i \leq \Delta\lambda_{ИК1}/5, \quad (6)$$

а для широкой зоны регистрации лучистого (светового) потока по её ширине $\Delta\lambda_i$ должно выполняться условие в виде

$$\Delta\lambda_{УФ}/2 < \Delta\lambda_i \leq \Delta\lambda_{УФ},\ \Delta\lambda_{ВИ}/3 < \Delta\lambda_i \leq \Delta\lambda_{ВИ},\ (\Delta\lambda_{ВИК})/4 < \Delta\lambda_i \leq (\Delta\lambda_{ВИК}),$$

$$\Delta\lambda_{ИК1}/5 < \Delta\lambda_i \leq \Delta\lambda_{ИК1}. \quad (7)$$

Обозначения: ВИК = (ВИ+ИК$_1$). Использование интегрального метода регистрации по входному лучистому потоку и его преобразование в сигналы изображения позволяет перейти к дифференциальному методу на уровне обработки самих зональных сигналов ТВ-изображений. Такой метод будет отображать интегрально–дифференциальный (ИД) способ регистрации лучистого (светового) потока и формирования разноспектральных сигналов изображений. В таблице 2 приведены возможные методы регистрации лучистого (светового) потока в УФ-, ВИ- и ИК-областях спектра по ширине зоны в заданном спектральном интервале длин волн от $\Delta\lambda_1$ до $\Delta\lambda_n$ для формирования разноспектральных изображений.

Таблица 2. Методы регистрации лучистого потока для формирования разно-спектральных изображений.

№ n/n	**Ширина зоны регистрации**	**Метод регистрации лучистого потока**		
		Дифференциальный	Интегральный	ИД
1.	Узкая	+	–	–
2.	Широкая	–	+	–
2.1	$(\lambda_i – \lambda_1)$	–	+	–
2.2	$(\lambda_n – \lambda_1)_{max}$	–	+	–
3.	Переменная	–	–	+

Регистрацию лучистого потока в спектральном участке длин волн λ_1 до λ_n для формирования сигналов изображений можно осуществлять в зонах регистрации с переменной шириной [6], а именно

$$(\lambda_n-\lambda_1)>,\ldots,>(\lambda_4-\lambda_1)>(\lambda_3-\lambda_1)>(\lambda_2-\lambda_1). \qquad (8)$$

Выполнение условия (8), путем преобразования лучистого (светового) потока в этих зонах, с использованием нескольких МФП, позволяет сформировать разноспектральные сигналы ТВ изображений в виде

$$U_1(\lambda_2-\lambda_1),U_2(\lambda_3-\lambda_1),U_3(\lambda_4-\lambda_1),\ldots,U_m(\lambda_n-\lambda_1). \qquad (9)$$

После получения нескольких таких сигналов и используя операцию вычитания между собой амплитудных значений соседних сигналов разноспектральных изображений можно сформировать сигналы, которые будут соответствовать сигналам «других» зон регистрации

$$\begin{gathered} U(\lambda_3-\lambda_2) = [U_2(\lambda_3-\lambda_1)-U_1(\lambda_2-\lambda_1)] \\ U(\lambda_4-\lambda_3) = [U_3(\lambda_4-\lambda_1)-U_2(\lambda_3-\lambda_1)] \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ U(\lambda_n-\lambda_{n-1}) = [U_m(\lambda_n-\lambda_1)-U_{m-1}(\lambda_{n-1}-\lambda_1)] \end{gathered} \qquad (10)$$

Выбирая необходимую ширину соседних зон регистрации лучистого потока, например, $(\lambda_3-\lambda_1)$ и $(\lambda_2-\lambda_1)$ можно получить значение сигнала для любой узкой зоны регистрации $(\lambda_3-\lambda_2)$.

Общее число разноспектральных сигналов, которые можно сформировать путем выполнения операций вычитания и суммирования исходных сигналов, за счет регистрации лучистого потока с переменной шириной зоны, показано в таблице 3. Общее число разноспектральных сигналов (исходных + вновь сформированных) составляет величину, равную

$$M = 2^m - 1, \qquad (11)$$

где m – исходное число зон регистрации лучистого потока.

Таблица 3. Общее число формируемых разноспектральных сигналов при интегрально-дифференциальном методе регистрации лучистого потока.

№ n/n	Число исходных разноспектральных сигналов	Число вновь сформированных разноспектральных сигналов	Общее число разноспектральных сигналов
1.	2	1	3
2.	3	4	7
3.	4	11	15
4.	5	26	31

Используя интегрально-дифференциальный метод формирования сигналов при меньшем числе зон регистрации лучистого (светового) потока можно обеспечить:

- получение на выходе системы большего числа разноспектральных сигналов;
- увеличение отношения сигнал/шум в исходных разноспектральных сигналах;
- снижение требований к чувствительности ТВ-камер и др.

На рисунке 3, для примера, показаны исходные спектральные характеристики двух $ОФ_1$ и $ОФ_2$, согласно (8). Вычитание из первого зонального сигнала изображения второго позволит формировать новый третий зональной сигнал изображения, согласно (10), с зоной регистрации лучистого потока, которая будет соответствовать «использованию» $ОФ_3$.

При использовании нескольких ОФ, имеющих разные СХ в одном широком спектральном участке (вплоть до длин волн от λ_1 до λ_n) можно осуществить интегральный метод регистрации лучистого потока [4]. В этом случае, нахождение значения зональных сигналов изображений будет сводиться к решению системы *m*–линейных уравнений, в которой определитель системы, составленный из коэффициентов пропускания ОФ, для *m*-зон регистрации лучистого (светового) потока должен быть больше нуля.

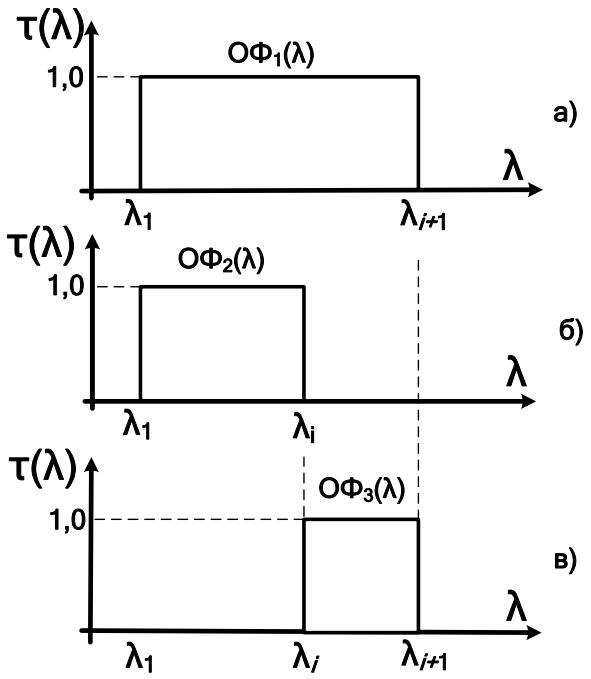


Рис. 3. Спектральные характеристики первого и второго ОФ.

Заключение

Одной из главных задач при построении разноспектральных ТВ-систем авиационного телевидения является правильный выбор зон регистрации лучистого (светового) потока и их необходимого числа в УФ-, ВИ- и ИК-областях спектра.

При априорных известных спектральных характеристиках объектов целесообразно использовать дифференциальный метод регистрации лучистого потока, в других случаях предпочтительней интегрально-дифференциальный или интегральный методы регистрации лучистого потока, которые могут обеспечить повышение достоверности обнаружения и селекции объектов с неизвестными спектральными характеристиками и малой отражательной способностью.

Правильный выбор зон регистрации лучистого потока обеспечит минимизацию габаритно-весовых показателей и энергетических параметров как самой ТВ-камеры, так и радиопередающей части разноспектральных систем авиационного телевидения, устанавливаемых на борту самолетов или БЛА. В целом использование рассмотренных методов регистрации лучистого потока позволит повысить эффективность применения разноспектральных ТВ-систем авиационного телевидения для решения задач наблюдения и анализа объектов подстилающей поверхности Земли.

Литература

1. Сагдуллаев Т.Ю., Сагдуллаев Ю.С. К вопросу выбора зон регистрации в спектрозональном телевидении // Вопросы радиоэлектроники. Серия Техника телевидения. Вып. 2, 2011. – С. 3-25.
2. Сагдуллаев Ю.С., Ковин С. Д. Восприятие и анализ разноспектральных изображений. – М., 2016. – 251 с.
3. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М., 2004. – 444 с.
4. Тепловизионное видеонаблюдение [Электронный ресурс]. URL: http://www.proximasp.ru/teplovizionnoe_videonablyudenie.html.
5. Сагдуллаев Ю.С., Ковин С.Д., Сагдуллаев Т.Ю., Смирнов А.И. Информационно-измерительные системы телевидения. – М., 2013. – 199 с.
6. Патент № 2604898 РФ. Способ формирования спектрозональных видеосигналов / Ковин С.Д., Сагдуллаев Ю.С. Приоритет от 26.06.2015. Опубл. 20.12.2016, бюл. № 35.

УДК 621.397.3

Арзуманян Э.П., д.т.н., с.н.с.

БИЛИНЕЙНЫЙ ИНТЕРПОЛЯТОР ДЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Предлагается алгоритмическое решение для интерполятора с широкими возможностями, который может быть реализован несложными программно-аппаратными средствами. Проведено математическое моделирование и даны рекомендации по созданию специализированного устройства для применения в конкретных инженерных задачах.

Постановка задачи

Наблюдаемые изображения различаются по масштабу, повороту и ракурсу. Человек-наблюдатель благодаря своему интеллекту распознает представленную ему картину со значительной достоверностью при существенных различиях по указанным параметрам.

При автоматическом распознавании объектов производится сличение наблюдаемого изображения с некоторыми эталонами, хранящимися в памяти устройства. В качестве эталонов используют либо образцовые изображения, либо набор их признаков, которые позволяют надежно идентифицировать объекты. В любом случае достоверное сравнение текущего изображения с эталоном может быть осуществлено при совпадении масштаба, поворота и ракурса.

Целью данной работы является создание инструментария на основе билинейного интерполятора, который позволяет модифицировать эталонное изображение по масштабу, углу поворота и ракурсу для его сличения с текущим.

Следует заметить, что рассматривается обработка лишь двумерных (плоских) изображений. Для обеспечения адекватности разрабатываемого алгоритма и создаваемых на его основе устройств требуется, чтобы высота наблюдения была много больше высоты объектов на наблюдаемой местности.

Решение задачи

Как отмечено выше, для решения поставленной задачи в качестве универсального инструмента используется билинейная интерполяция [1]. С её помощью можно осуществить не только масштабирование, но также поворот и изменение ракурса изображения [2]. Для упрощения анализа исходное изображения принято квадратным с размером стороны $\boldsymbol{N}$. В общем случае для масштабирования требуется выполнение следующей процедуры:

$$\begin{aligned} Av_{i,j} &= (i-n)\cdot cv + n; \\ Ah_{i,j} &= (j-n)\cdot ch + n, \end{aligned} \qquad (1)$$

где: $\boldsymbol{i} = 0\ldots\boldsymbol{N}-1$ и $\boldsymbol{j} = 0\ldots\boldsymbol{N}-1$ – индексы элементов яркости массива $\boldsymbol{N}$ x $\boldsymbol{N}$;

$\boldsymbol{n} = \dfrac{\boldsymbol{N}}{2}$ для центрирования координат массива;

$\boldsymbol{cv}$ – коэффициент масштабирования по вертикали;

$\boldsymbol{ch}$ – коэффициент масштабирования по горизонтали.

Функции $\boldsymbol{Av}_{i,j}$ и $\boldsymbol{Ah}_{i,j}$ названы виртуальными адресами памяти, поскольку по ним будут определены истинные целочисленные адреса четырех элементов яркости массива $\boldsymbol{N}$ ($av0$; $av1$; $ah0$; $ah1$), необходимые для вычисления значения

яркости искомого элемента $\boldsymbol{B_{i,j}}$ интерполируемого массива. Этот подход позволяет рационально использовать ресурсы решающего устройства и придать ему универсальное свойство. При этом дробные части функций $\boldsymbol{Av}_{i,j}$ и $\boldsymbol{Ah}_{i,j}$ представляют собой весовые коэффициенты интерполяции следующим образом:

$$\begin{aligned} qv_{i,j} &= \mathrm{mod}(Av_{i,j},1); \\ qh_{i,j} &= \mathrm{mod}(Ah_{i,j},1); \\ qv^{*}_{i,j} &= 1 - qv_{i,j}; \\ qh^{*}_{i,j} &= 1 - qh_{i,j}, \end{aligned} \qquad (2)$$

где $\boldsymbol{qv}^{*}$ и $\boldsymbol{qh}^{*}$ – инверсные значения $\boldsymbol{qv}$ *и* $\boldsymbol{qh}$ соответственно. Здесь 1 – дискретный шаг исходного изображения.

Следует заметить, что при аппаратной реализации алгоритма достаточно иметь значение $\boldsymbol{qv}$ *и* $\boldsymbol{qh}$ *в четыре двоичных разряда после запятой, чтобы получить погрешность воспроизведения изображения в 1/256, что составляет менее 0,4 %.*

Таким образом, адреса памяти близлежащих элементов яркости определяют следующим образом:

$$\begin{aligned} av0_{i,j} &= Av_{i.j} - qv_{i,j}; \\ av1_{i,j} &= av0_{i,j} + 1; \\ ah0_{i,j} &= Ah_{i.j} - qh_{i,j}; \\ ah1_{i,j} &= ah0_{i,j} + 1. \end{aligned} \qquad (3)$$

Далее, по значениям (2) определяют двумерные весовые коэффициенты для каждого элемента яркости:

$$\begin{aligned} Q00_{i,j} &= qv^{*}_{i,j} \cdot qh^{*}_{i,j}; \\ Q10_{i,j} &= qv_{i,j} \cdot qh^{*}_{i,j}; \\ Q01_{i,j} &= qv^{*}_{i,j} \cdot qh_{i,j}; \\ Q11_{i,j} &= qv_{i,j} \cdot qh_{i,j}. \end{aligned} \qquad (4)$$

Геометрическое толкование весового коэффициента $\mathbf{Q}_{**}$ можно получить из иллюстрации на рисунке 1. В рассматриваемом примере коэффициент $\boldsymbol{Q_{21}}$ определяется площадью большого заштрихованного прямоугольника,

занимающего противоположную область от элемента $\boldsymbol{b_{21}}$, а из (4) $\boldsymbol{qv^*}$ и $\boldsymbol{qh}$ являются сторонами такого прямоугольника.

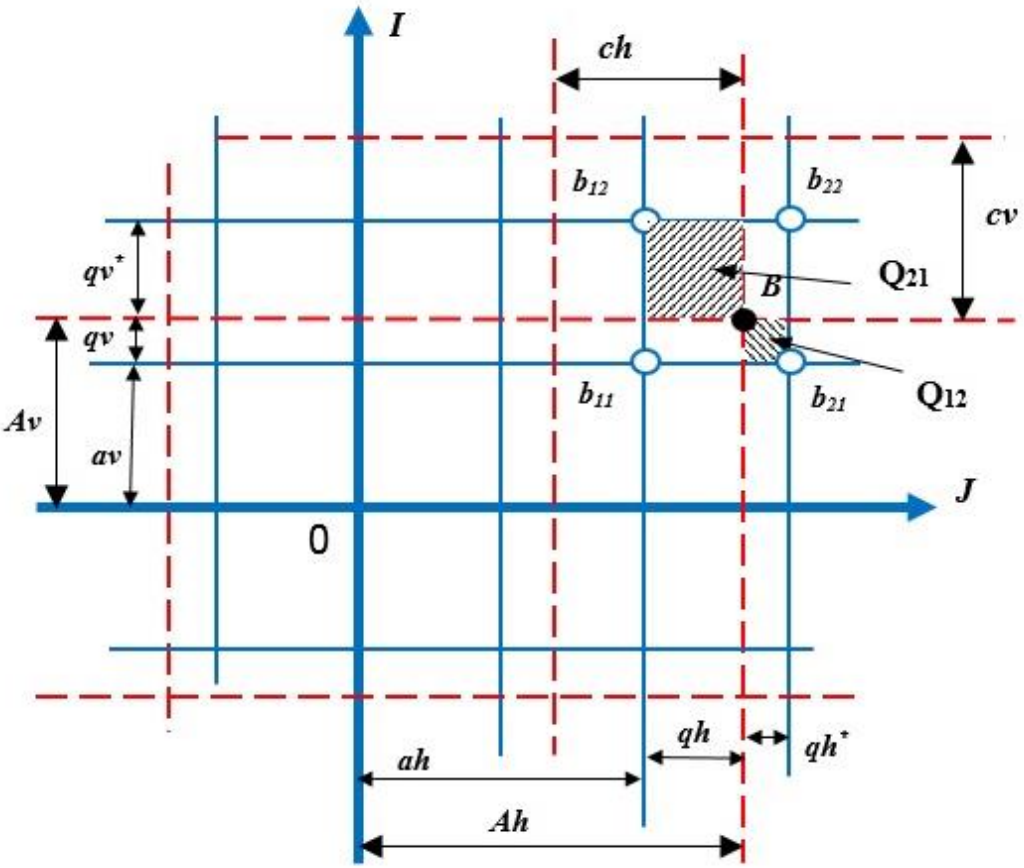


Рис. 1. Геометрическое представление процедуры билинейной интерполяции.

Для получения нормированного значения элемента яркости $\boldsymbol{B}$ сумма весовых коэффициентов должна равняться единице, т.е.

$$\Sigma Q_{**} = 1 \tag{5}$$

Обозначив двумерную функцию яркости через $\boldsymbol{B_n}$, представляющую исходное изображение, записывают составные части $\boldsymbol{B_{**}}$ нового изображения $\boldsymbol{B_{i,j}}$ следующим образом:

$$\begin{aligned} B00_{i,j} &= Bn_{av0_{i,j}\,ah0_{i,j}} \cdot Q00_{i,j}; \\ B01_{i,j} &= Bn_{av0_{i,j}\,ah1_{i,j}} \cdot Q01_{i,j}; \\ B10_{i,j} &= Bn_{av1_{i,j}\,ah0_{i,j}} \cdot Q10_{i,j}; \\ B11_{i,j} &= Bn_{av1_{i,j}\,ah1_{i,j}} \cdot Q11_{i,j}. \end{aligned} \tag{6}$$

Тогда,

$$B_{i,j} = B00_{i,j} + B01_{i,j} + B10_{i,j} + B11_{i,j}. \qquad (7)$$

Данный материал излагается и иллюстрируется с помощью модели, построенной в системе Mathcad. Однако Mathcad используется исключительно как математический аппарат и ни в коем случае не используются его встроенные функции [3]. В модели испытуемое изображение имеет ограниченные размеры, сторона квадратного ландшафта составляет $\boldsymbol{L}$ = 300 м. Поэтому дальнейшее изложение ведется с учетом их привязки к модели.

Интерполяция по этой модели исправно выполняется, если $\boldsymbol{cv} \le \left(1-2^N\right)$ и $\boldsymbol{ch} \le \left(1-2^N\right)$. При этом изображение остается в пределах матрицы N либо (при $\boldsymbol{cv} < 1;\ \boldsymbol{ch} < 1$) увеличивается, исключая периферийные элементы, выходящие за её пределы.

Иначе обстоит дело, когда изображение уменьшается $(\boldsymbol{cv} \ge 1;\ \boldsymbol{ch} \ge 1)$ и на периферии матрицы $\boldsymbol{N}$ образуются «пустоты», при этом формулы (3) принимают отрицательные значения, нарушающие правило формирования адресов памяти. Как видно из (6) массивы по формулам (3) служат индексами для извлечения составных частей изображения (7). С целью исключения отрицательных индексов проводят следующую процедуру. Устанавливают условия $\boldsymbol{cd_v}$ и $\boldsymbol{cd_h}$, при которых выделяются индексы только с положительным знаком:

$$\begin{aligned} cd_{v0_{i,j}} &= 1 < a_{v0_{i,j}} < N; \\ cd_{v1_{i,j}} &= 1 < a_{v1_{i,j}} < N; \\ cd_{h0_{i,j}} &= 1 < a_{h0_{i,j}} < N; \\ cd_{h1_{i,j}} &= 1 < a_{h1_{i,j}} < N. \end{aligned} \qquad (8)$$

С учетом (8) формируют новые индексы следующим образом:

$$a'_{v0_{i,j}} = \left| \begin{array}{l} a_{v0_{i,j}} \ - \text{ если } cd_{v0_{i,j}} = 1 \\ 0 \ - \textit{ в } \text{остальных случаях} \end{array} \right. ;$$

$$a'_{v1_{i,j}} = \left| \begin{array}{l} a_{v1_{i,j}} \ - \text{ если } cd_{v1_{i,j}} = 1 \\ 0 \ - \textit{ в } \text{остальных случаях} \end{array} \right. ;$$

$$a'_{h0_{i,j}} = \left| \begin{array}{l} a_{h0_{i,j}} \ - \text{ если } cd_{h0_{i,j}} = 1 \\ 0 \ - \textit{ в } \text{остальных случаях} \end{array} \right. ; \qquad (9)$$

$$a'_{h0_{i,j}} = \left| \begin{array}{l} a_{h1_{i,j}} \ - \text{ если } cd_{h1_{i,j}} = 1 \\ 0 \ - \textit{ в } \text{остальных случаях} \end{array} \right. ,$$

а окончательный результат с учетом модификации (6) ***B***** примет следующий вид:

$$B00_{i,j} = Bn_{a'v0_{i,j},a'h0_{i,j}} Q00_{i,j} \cdot cd_{v0_{i,j}} \cdot cd_{h0_{i,j}};$$

$$B01_{i,j} = Bn_{a'v0_{i,j},a'h1_{i,j}} Q01_{i,j} \cdot cd_{v0_{i,j}} \cdot cd_{h1_{i,j}};$$

$$B10_{i,j} = Bn_{a'v1_{i,j},a'h0_{i,j}} Q10_{i,j} \cdot cd_{v1_{i,j}} \cdot cd_{h0_{i,j}}; \qquad (10)$$

$$B11_{i,j} = Bn_{a'v1_{i,j},a'h1_{i,j}} Q00_{i,j} \cdot cd_{v1_{i,j}} \cdot cd_{h1_{i,j}},$$

$$\text{и} \quad B_{i,j} = B00_{i,j} + B01_{i,j} + B10_{i,j} + B11_{i,j}.$$

Следует помнить, что группу формул (8), (9) и (10) используют лишь для организации модели.

До сих пор билинейная интерполяция рассматривалась как инструмент масштабирования. Далее показано, что билинейная интерполяция позволяет осуществлять поворот изображения, для чего требуется дополнить виртуальный адрес (1) параметром угла поворота **γ,** не изменяя порядок и последовательность выполнения процедур обработки по (2) ÷ (10).

$$Av_{i,j} = (i-n) \cdot cv \cdot \sin\gamma + (j-n) \cdot ch \cdot \cos\gamma + n;$$
$$Ah_{i,j} = (j-n) \cdot ch \cdot \cos\gamma - (i-n) \cdot ch \cdot \sin\gamma + n. \qquad (11)$$

В частном случае, когда $\gamma = 45°$, формула (11) упрощается следующим образом:

$$Av_{i,j} = (i-n) \cdot cv + (j-n) \cdot ch + n;$$
$$Ah_{i,j} = (j-n) \cdot ch - (i-n) \cdot ch + n. \qquad (12)$$

В повернутой системе координат на произвольный угол **γ** определение весовых коэффициентов **Q**** по (11) производится, как иллюстрировано на

рисунке 2. Здесь также показано, что коэффициентам масштабирования ***cv*** и ***ch*** могут быть присвоены разные значения.

Как видно из (11), порядок вычисления формул, дополненных функциями поворота, остается неизменным.

Аналогичным образом можно воспроизвести наклон поверхности, наблюдаемой с определенной точки пространства. В этом случае потребуется дополнить формулы виртуального адреса параметрами, описывающими пространство и средства наблюдения.

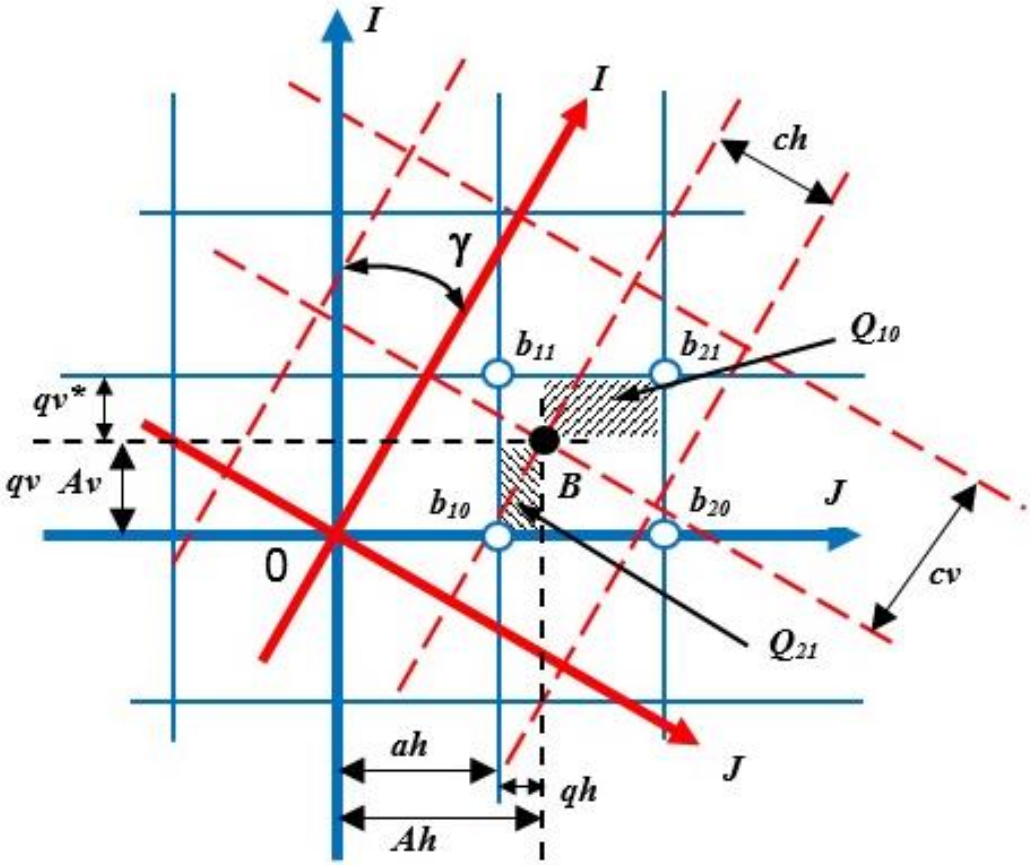


Рис. 2. Иллюстрация процедуры определения весовых коэффициентов.

Поскольку в работе рассматриваются только геометрические свойства поставленной задачи, ограничимся параметрами высоты ***H*** и дистанции ***D*** до центра наблюдаемого ландшафта, при этом угол наклона **φ** линии визирования определяется как $\varphi = \mathrm{arctg}\left(\frac{D}{H}\right)$, а оптическое средство характеризуется углом зрения **θ**. Очевидно, что при воспроизведении наклонной плоскости, точки яркости распределяются на разных расстояниях, а значит, весовые

коэффициенты по всей плоскости изображения зависят от указанных четырех параметров.

Для дополнения формул виртуального адреса параметрами пространства взамен коэффициентов масштабирования ***cv*** и ***ch*** вводят функции, характеризующие межэлементное расстояние в оптическом поле в направлениях координат ***i*** (для вертикального расстояния ***dv***) и ***j*** (для горизонтального расстояния ***dh***).

$$\begin{aligned} dh_j &= \frac{N \cdot H}{L} \cdot \left[\mathrm{tg}\left(\varphi - \frac{\theta}{2} + j \cdot d\theta + d\theta \right) - \mathrm{tg}\left(\varphi - \frac{\theta}{2} + j \cdot d\theta \right) \right]; \\ dv_i &= \frac{N \cdot H}{L} \cdot \left[\mathrm{tg}\left(\varphi - \frac{\theta}{2} + i \cdot d\theta + d\theta \right) - \mathrm{tg}\left(\varphi - \frac{\theta}{2} + i \cdot d\theta \right) \right], \end{aligned} \tag{13}$$

где $d\theta = \dfrac{\theta}{N}$ – элементарный оптический угол зрения (градус на пиксель).

Окончательно формулы виртуальных адресов принимают следующий вид: для наклона по курсу –

$$\begin{aligned} Av_{i,j} &= (j-n) \cdot \sin(\gamma) dv_j + (i-n) \cos(\gamma) \cdot dh_i + n; \\ Ah_{i,j} &= (j-n) \cdot \cos(\gamma) dv_i + (i-n) \sin(\gamma) \cdot dh_j + n; \end{aligned} \tag{14}$$

для наклона по крену –

$$\begin{aligned} Av_{i,j} &= (j-n) \cdot \sin(\gamma) dv_i + (i-n) \cos(\gamma) \cdot dh_j + n; \\ Ah_{i,j} &= (j-n) \cdot \cos(\gamma) dv_j + (i-n) \sin(\gamma) \cdot dh_i + n. \end{aligned} \tag{15}$$

Различие между выражениями (14) и (15) состоит лишь в расположении индексов ***i*** и ***j***. Аналогичные соображения действуют и для индексов выражений (13). Указанные особенности могут быть учтены при организации вычислительной структуры решающего устройства.

Рекомендации по технической реализации

На рисунке 3 приведена блок-схема алгоритма полной процедуры интерполяции. В ней выделен блок вычисления виртуального адреса, который по сравнению с другими процедурными блоками требует значительно большей вычислительной мощности. Поэтому целесообразно выполнять вычисления данного блока на аппаратных средствах, в частности, с применением

табличных методов, которые часто используются при вычислении тригонометрических функций.

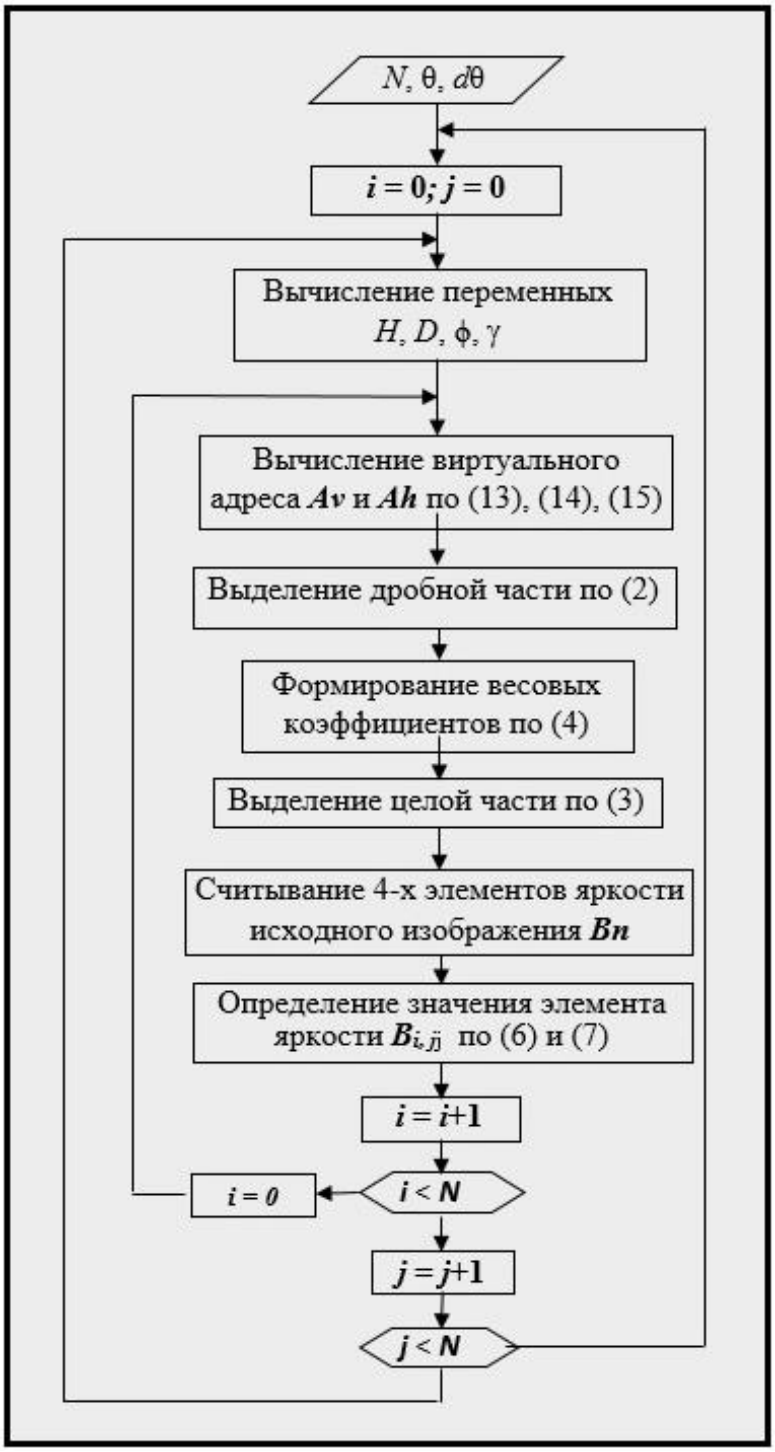


Рис. 3. Блок-схема алгоритма билинейного интерполятора.

Следует заметить, что:

- выражения (14) и (15) являются универсальными при изменении параметров высоты, дальности, наклонного угла наблюдения и поворота относительно центра изображения;
- ряд функций отличаются лишь расположением индексов $\boldsymbol{i}$ и $\boldsymbol{j}$, что позволяет существенно упростить техническую реализацию устройства (Кроме того, центрирующие индексы $(\boldsymbol{i}-\boldsymbol{n})$ и $(\boldsymbol{j}-\boldsymbol{n})$ подчеркивают, что процедуры выполняются относительно центра изображения. В зависимости от организации запоминающего устройства параметр $\boldsymbol{n}$ может быть исключен.);
- в выражении (13) также имеется возможность упростить структуру, вычисляющую $\boldsymbol{dv}$ и $\boldsymbol{dh}$ (Здесь параметры датчика изображения $\boldsymbol{N}$, и $\boldsymbol{\theta}$ являются неизменными, что также способствует составлению вычислительных таблиц с применением тригонометрических функций).

Таким образом, основной подход при организации вычислительного процесса заключается в рациональном распределении аппаратных и программных средств, цель которого – создание специализированного устройства, обеспечивающее воспроизведение интерполяции в реальном масштабе времени.

Иллюстрация результатов моделирования

Для иллюстрации результатов моделирования ниже приведены два режима преобразования изображения при разных сочетаниях параметров $\boldsymbol{H}$, $\boldsymbol{D}$ и $\boldsymbol{\gamma}$. При этом $\boldsymbol{\theta}=12°$; $\boldsymbol{L}=300$м и $\boldsymbol{N}=720$ ТВ-элементов остаются неизменными. Прогон модели осуществлен в режиме генерирования видеопоследовательностей, из которых выбраны промежуточные кадры.

Желтая рамка обрамляет видимую часть ландшафта, красная рамка – пределы ландшафта. Начальные условия для всех режимов: $\boldsymbol{\gamma}=0$; $\boldsymbol{\varphi}=0$; $\boldsymbol{D}=0$.

На рисунке 4 приведены кадры из режима изменения высоты наблюдения с одновременным вращением изображения вокруг своего центра. Численные значения этих параметров приведены справа от каждого наблюдаемого кадра. На рисунке 5 приведены кадры из режима воспроизведения прямой перспективы при изменении дальности на неизменной высоте наблюдения.

В случае обработки фрагментов телевизионного кадра, например, 128×128 пикселей, время выполнения интерполяции составит не более 3 мс при использовании современных микропроцессоров и ПЛИС.

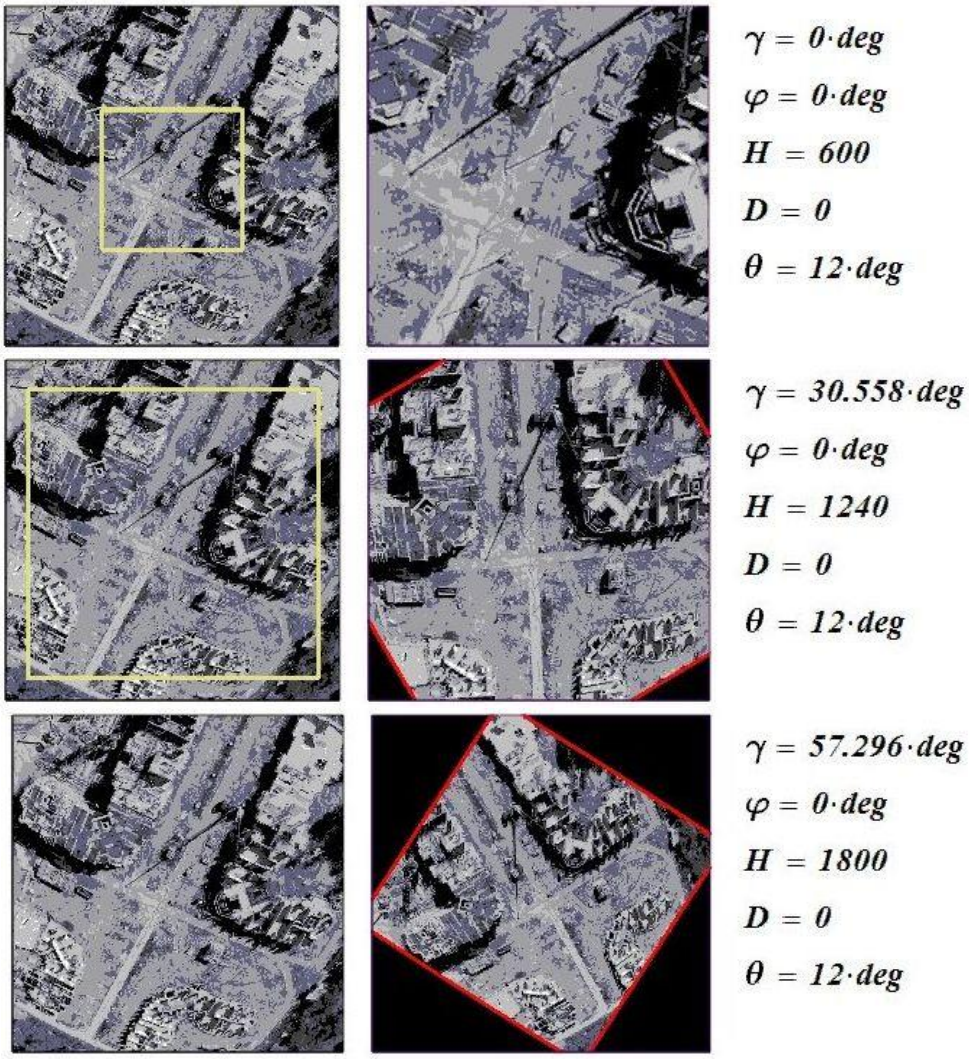


Рис. 4. Изменение высоты наблюдения с поворотом относительно центра.

Выводы

1. Предложена форма виртуального адреса обращения к памяти, которая содержит информацию, необходимую для реализации любого из рассмотренных геометрических преобразований изображения.
2. Геометрический подход к определению весовых коэффициентов делает более прозрачной реализацию билинейного интерполятора.
3. Сходство фрагментов математических выражений с тригонометрическими функциями позволяет рациональным образом организовать

табличные вычислительные структуры, что существенно сокращает время выполнения интерполяции без увеличения объема аппаратуры.

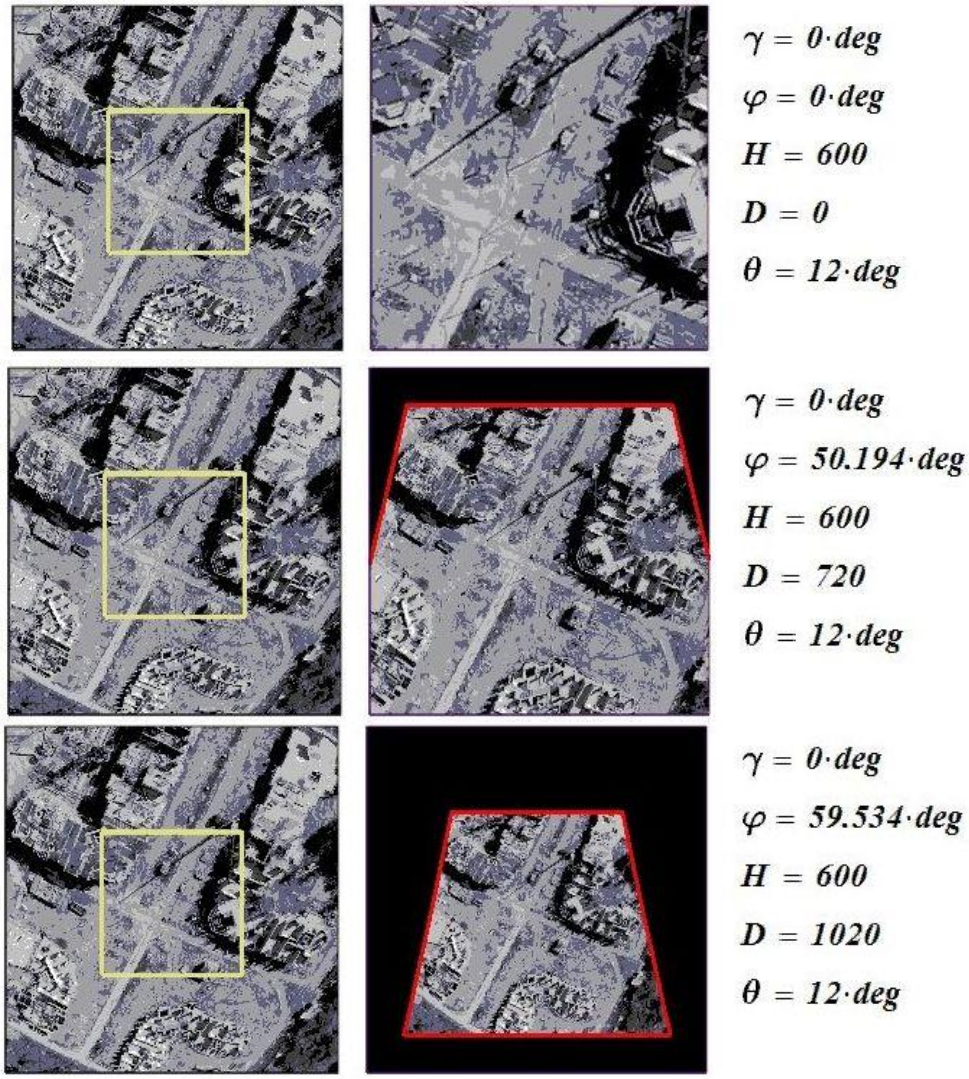


Рис. 5. Наблюдение прямой перспективы с изменением дальности.

Заключение

1. Билинейный интерполятор представляет собой универсальный инструмент обработки изображения, который может быть успешно применен для решения задач робототехники, в частности, для распознавания образов.
2. Модель построена в среде Mathcad, но для обеспечения адекватности обработки использованы не стандартные операторы Mathcad, а математические выражения, соответствующие фактически применяемым в алгоритмах интерполяции.

Литература

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – Кн. 2. – 480 с.
2. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений: учебное пособие. – СПб., 2011. – 608 с.
3. Половко А.М., Бутусов П.Н. Интерполяция. Методы и компьютерные технологии их реализации. – СПб., 2004. – 320 с.

УДК 621.397

Жигов Г.А.
Зеленин С.А.
Сорока Е.З., к.т.н, с.н.с.
Филатов В.С., к.т.н.

МЕТОД ПОСТОБРАБОТКИ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ИСКАЖЕНИЙ ДИСКРЕТИЗАЦИИ В ТВ-КАМЕРЕ

Рассматривается метод обработки цифрового изображения, обеспечивающий уменьшение возникающих в камере искажений дискретизации путем сочетания двумерной дискретной интерполяционной фильтрации и аналоговой фильтрации низких частот при воспроизведении изображения.

Введение

Во всех современных телевизионных системах используются матричные источники изображения (передающие камеры) и матричные средства отображения (плоские матричные видеомониторы). Таким образом, на передающей стороне изображение разбивается на пикселы (дискретизируется), а на приемной стороне производится восстановление наблюдаемого изображения из дискретных пикселов.

Правила дискретизации определяются теоремой отсчетов [1, 2], которая выражает следующую известную закономерность: функция с ограниченным частотным спектром может быть точно передана с помощью отсчетов,

следующих с частотой, которая, по крайней мере, вдвое выше верхней граничной частоты спектра.

Удобный аппарат исследования процессов дискретизации был предложен в [3]. В его основе лежит эквивалентная схема, представленная на рисунке 1. Важную роль играет предфильтр, который позволяет ограничить частотный спектр входного изображения и тем самым обеспечить условия выполнения теоремы отсчетов [4].

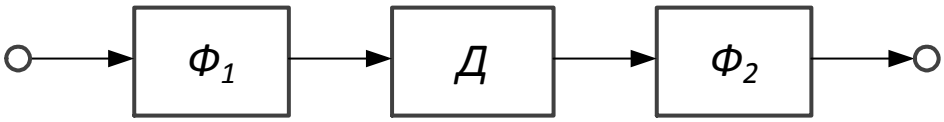


Рис. 1. Эквивалентная схема дискретизации изображения.

Достоинство этой схемы состоит в том, что она позволяет четко разделить функции предфильтрации ($Ф_1$), постфильтрации ($Ф_2$) и собственно дискретизации (*Д*), которые в реальных технических системах могут совмещаться.

Сам процесс дискретизации удобно описывать с помощью дискретизирующих функций [3], которые представляют собой последовательности смещенных дельта-функций.

Анализ дискретизации изображения светочувствительной матрицей

Все современные телевизионные камеры строятся на основе матричных светочувствительных датчиков, которые осуществляют дискретизацию входного изображения, причем функции предфильтра $Ф_1$ реализуются за счет интегрирования приходящего излучения в пределах пиксельной площадки в светочувствительной матрице. В случае если соседние площадки непосредственно граничат и имеют квадратную форму и размер $X \times X$, то шаг дискретизации составляет X как по горизонтали, так и по вертикали, и импульсная характеристика предфильтра выражается произведением П-образных характеристик по обеим координатам:

$$G_1(x, y) = \Pi\left(\frac{x}{X}\right)\Pi\left(\frac{y}{X}\right), \qquad (1)$$

где функция прямоугольная функция П определена как

$$\Pi(z) = \begin{cases} 1 \text{ при } |z| < \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \text{ при } |z| = \frac{1}{2} \\ 0 \text{ при } |z| > \frac{1}{2}. \end{cases} \quad (2)$$

Частотная характеристика фильтра с такой импульсной характеристикой имеет вид

$$k(\gamma) = \frac{2}{\gamma X} \sin\left(\frac{\gamma X}{2}\right), \quad (3)$$

где γ – круговая частота.

Преобразование Фурье от $G(x, y)$ с учетом (3) дает частотно-контрастную характеристику светочувствительной матрицы:

$$\mathcal{K}_1(\nu, \omega) = \frac{2}{\nu X} \sin\left(\frac{\nu X}{2}\right) \cdot \frac{2}{\omega X} \sin\left(\frac{\omega X}{2}\right), \quad (4)$$

где ν и ω – круговые частоты по вертикали и горизонтали.

Физический смысл этой характеристики состоит в том, что в самой камере происходит ослабление высоких пространственных частот, которое к граничным частотам по каждой частотной координате достигает 4 дБ. (Граничная частота, как сказано ранее, составляет $n/2$ периодов на высоту изображения, где n – число активных строк в кадре.)

При уменьшении физического размера светочувствительных площадок в матрице, т.е. при введении «просветов» между пикселами это ослабление можно было бы уменьшить, но ценой снижения энергетической эффективности (ухудшения отношения сигнал-шум).

Для оценки искажений, возникающих собственно в светочувствительной матрице передающей камеры из-за её дискретной структуры, воспользуемся вначале <u>одномерной</u> математической моделью происходящих преобразований частотного спектра входного изображения.

Примем, что входное изображение (одномерное) имеет гауссов спектр

$$\mathcal{F}(f) = \exp(-a f^2/4n^2), \quad (5)$$

где n – число строк в изображении, f – пространственная частота в периодах на высоту изображения, a – постоянная, определяющая ширину спектра (т.е. скорость убывания спектра с частотой).

Частотная характеристика фильтра Φ_1 определяется преобразованием Фурье от П(x/X). С учетом того, что здесь $X = 1/n$, получаем

$$\mathcal{K}_1(f) = \mathrm{sinc}(\pi f/n) = \frac{n}{\pi f}\sin(\pi f/n) \ , \qquad (6)$$

т.е. при $f = n$ функция $\mathcal{K}_1(f)$ обращается в ноль.

На рисунке 2 представлены преобразования спектра изображения, образуемого матричным датчиком.

На диаграмме (а) показаны исходные гауссовы спектры изображения $\mathcal{F}(f)$ (с параметром $a = 23$), частотная характеристика предфильтра $\mathcal{K}_1(f)$ и спектр изображения $\mathcal{F}_1(f)$ после прохождения предфильтра. Кроме того, показана частотная характеристика идеального предфильтра (и постфильтра), при которых теорема отсчетов выполняется без искажения изображения.

На диаграмме (б) показан фрагмент периодизированного спектра $\mathcal{F}_1^*(f)$ после дискретизации – основная и ближайшие побочные составляющие, ЧКХ постфильтра и спектр изображения после постфильтра.

На диаграмме (в) показаны основной и ближайшие побочные спектры изображения $\mathcal{F}_2(f)$ после прохождения постфильтра, имеющего такую же частотную характеристику, что и предфильтр.

Как видно из представленной одномерной модели, при квадратных пикселах (т.е. при частотных характеристиках по обеим координатам типа $\sin x/x$) в получаемое с помощью матричных датчиков изображение вносятся *неустранимые искажения*: линейные (ослабление верхних частот спектра изображения) и нелинейные (появление ложных частот в спектре от побочных спектральных составляющих в процессе дискретизации).

Для эксперимента были выбраны фотография городского пейзажа (рисунок 4) и портрет (рисунок 5), причем перед моделированием их формат был адаптирован под формат 640×480.

Приведенные на рисунке 2 преобразования частотного спектра изображения сохраняют форму при любом разрешении датчика, т.е. при любом числе строк n в светочувствительной матрице. Они только масштабируются по частоте пропорционально числу n.

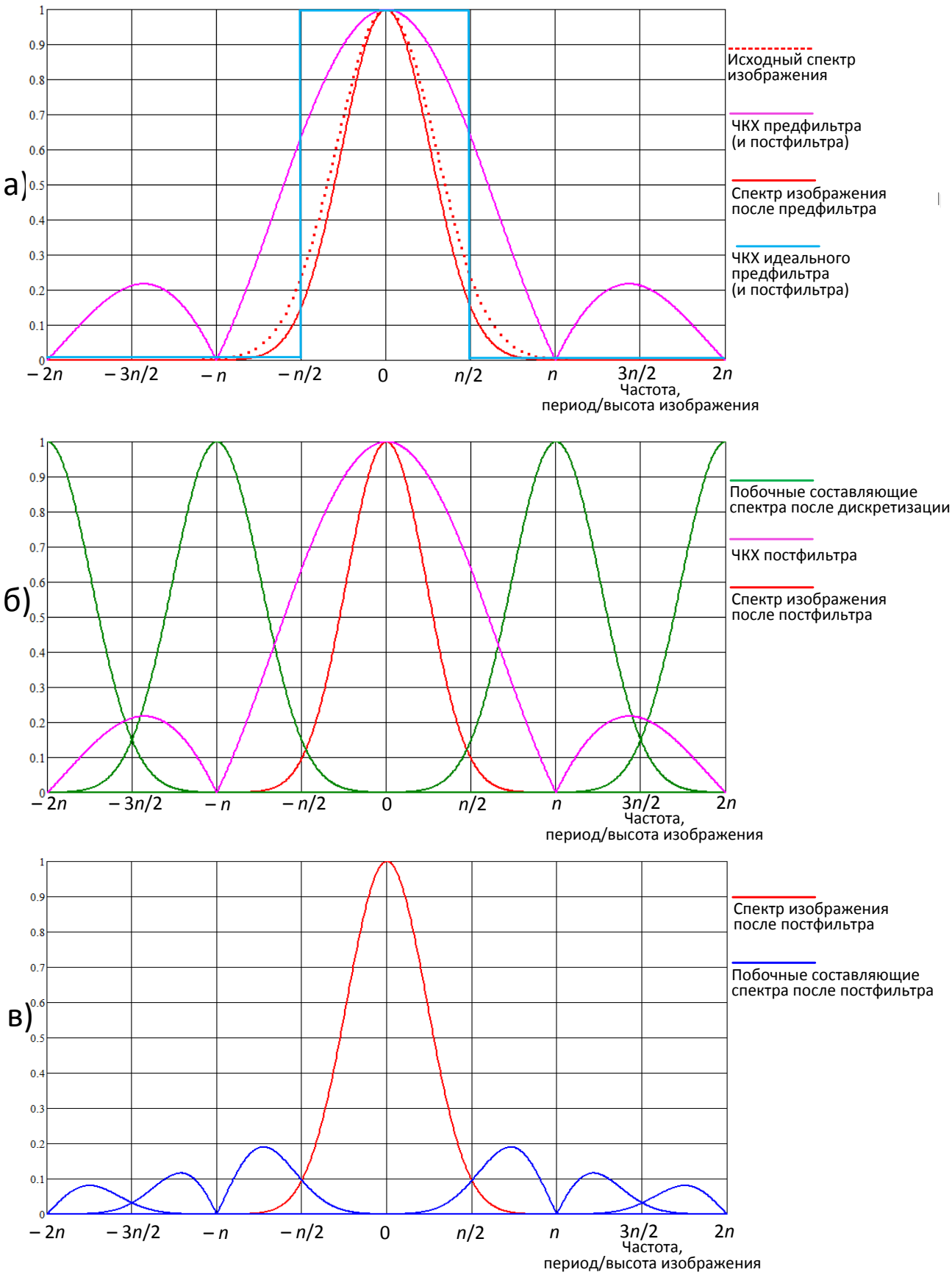


Рис. 2. Преобразования спектра изображения в матричном датчике.

По-видимому, единственной возможностью улучшения изображения, получаемого от матричного источника, является модификация постобработки изображения, включающей в себя постфильтрацию в эквивалентной схеме на рисунке 1.

Эта модификация состоит в удвоении числа отсчетов по каждой координате, причем новые отсчеты получаются из имеющихся с помощью линейной интерполяции посредством дискретного фильтра ([7], гл. 6), имеющего в простейшем варианте импульсную характеристику

$$g_{д}^{*}(x) = 0{,}5\ \delta(x + \frac{X}{2}) + \delta(x) + 0{,}5\ \delta(x - \frac{X}{2}). \qquad (7)$$

При этом новые отсчеты (пикселы) формируются путем линейной интерполяции соседних пикселов согласно (7).

Благодаря такой фильтрации происходит удвоение числа отсчетов, причем новые отсчеты находятся как взвешенная сумма двух соседних исходных. Очевидно, что выражение (7) является сверткой двух «прямоугольных» импульсных характеристик вида

$$0{,}5\ \delta(x + \frac{X}{2}) + 0{,}5\ \delta(x - \frac{X}{2}). \qquad (8)$$

Соответствующая частотная характеристика является преобразованием Фурье от импульсной характеристики (8), что дает косинусоидальную частотную характеристику и записывается как

$$\cos(\pi f / 2n). \qquad (9)$$

Свертке двух импульсных характеристик (8) соответствует произведение частотных характеристик в спектральной области (9), что дает частотную характеристику интерполирующего дискретного фильтра в виде

$$k_{д}^{*}(f) = \cos^2(\pi f / 2n). \qquad (10)$$

Завершающим элементом модифицированного постфильтра является аналоговый фильтр с частотной характеристикой (определяемой с учетом уменьшения вдвое размера пиксела)

$$k_{а}(f) = \mathrm{sinc}(\pi f / 2n), \qquad (11)$$

соответствующий структуре матрицы отображения с удвоенным числом отсчетов и квадратной формой пикселов.

Результирующие преобразования частотного спектра изображения представлены на рисунке 3. Первый шаг преобразования спектра, включающий предфильтрацию и дискретизацию изображения, не отличается от приведенного выше (а) на рисунке 2 и здесь не показан.

На диаграмме (б) показан фрагмент периодизированного спектра $\mathcal{F}_1^*(f)$ после дискретизации – основная и ближайшие побочные составляющие, а также частотная характеристика интерполирующего фильтра (10).

На диаграмме (в) показаны основной и ближайшие побочные спектры изображения $\mathcal{F}_д^*(f)$ после интерполирующего фильтра (10).

На диаграмме (г) показаны основной и ближайшие побочные спектры изображения $\mathcal{F}_2(f)$ после прохождения аналогового постфильтра (11).

Как следует из сравнения диаграммы (в) рисунка 2 и диаграммы (г) рисунка 3, предложенное удвоение числа пикселов с линейной интерполяцией обеспечивает более чем двукратное ослабление амплитуды побочных спектров, т.е. заметное улучшение обрабатываемого изображения.

Теоретически можно достичь дальнейшего снижения искажений при переходе от линейной интерполяции к более сложной, обеспечивающей лучшее приближение к идеальной интерполирующей функции $\sin x/x$. Однако ожидаемое улучшение будет гораздо менее заметным, чем полученное при переходе от интерполяции нулевого порядка (прямоугольная импульсная характеристика) к линейной интерполяции (треугольная импульсная характеристика), а вычислительная сложность при этом будет возрастать [5].

Экспериментальная проверка

Было выполнено моделирование описанной обработки изображений в среде Matlab, чтобы оценить возможности повышения качества изображений при их постобработке с интерполяцией отсчетов.

Для сохранения размера изображения при моделировании стандартного способа обработки производится удвоение числа пикселов камеры по каждой координате путем четырехкратного повторения каждого исходного пиксела, так что фактически сохраняется исходная матричная структура изображения.

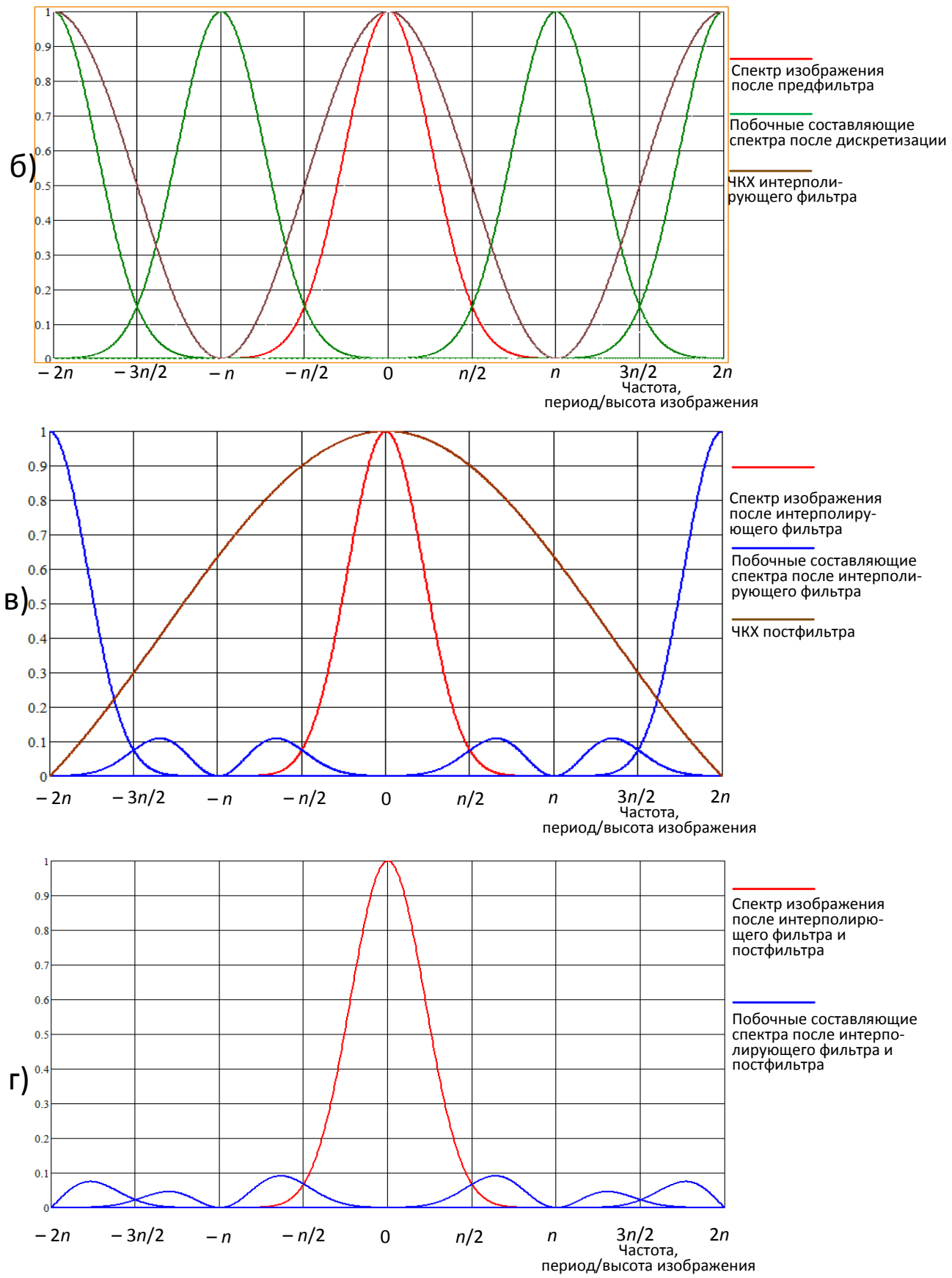
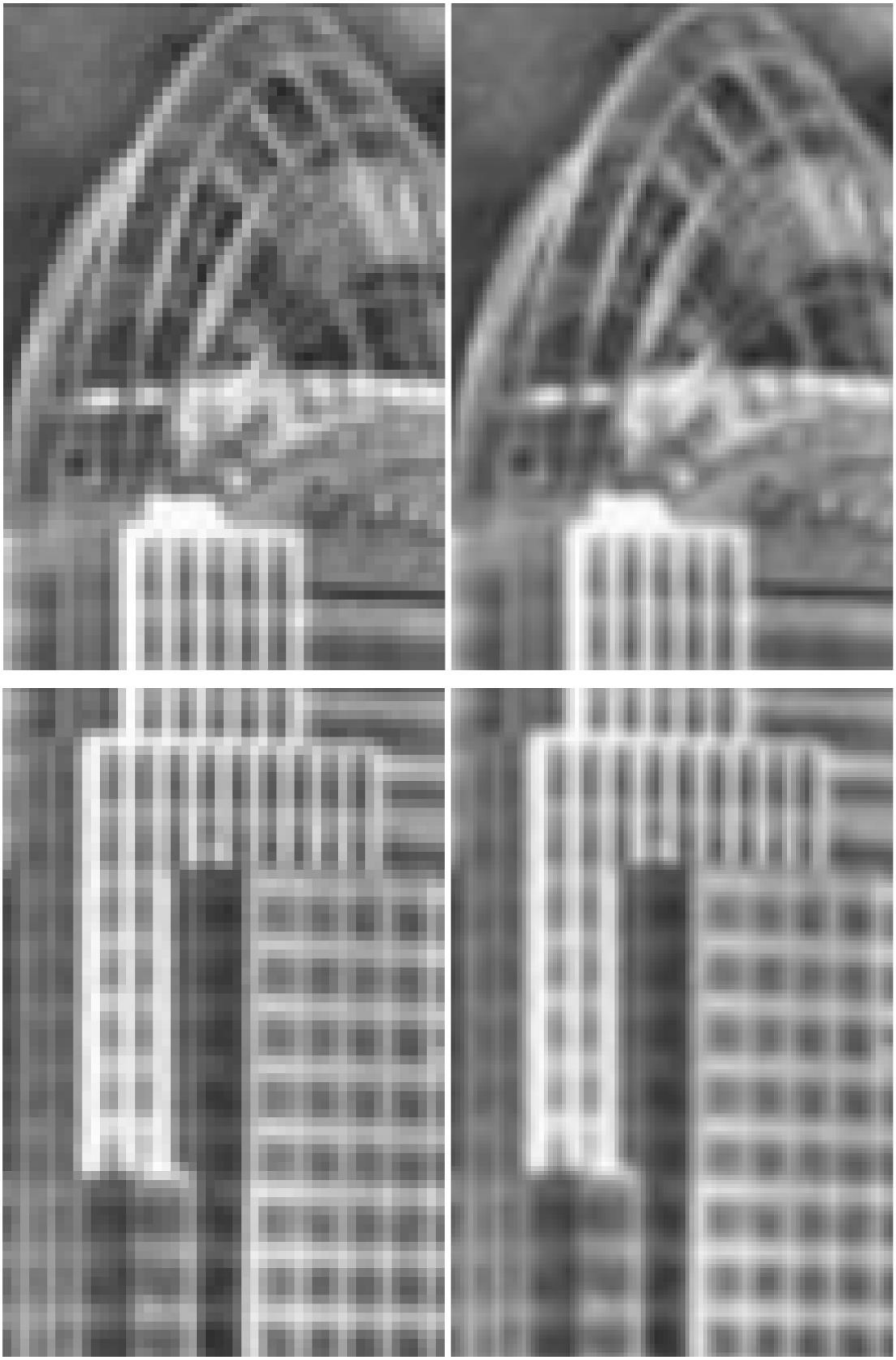


Рис. 3. Преобразования спектра изображения в матричном датчике с интерполяцией выходных пикселов.

При улучшенном способе число пикселов камеры также удваивается по каждой координате, но дополнительные пикселы создаются с использованием интерполяции исходных. Практически применялась билинейная интерполяция, которая требует лишь незначительного увеличения вычислительных операций.

Рис. 4. Исходное изображение – городской пейзаж (г. Бостон, США).

Рис. 5. Исходное изображение – портрет (Сьюзи).



а) б)

Рис. 6. Увеличенные фрагменты обработанного изображения рис. 4:

а) обработка с повторением пикселов;

б) обработка с интерполяцией пикселов.

На рисунках 4 и 5 представлены изображения, использованные для обработки (рисунок 5 взят из http://compression.ru/video/denoising_copy/).

На рисунках 6 и 7 приведены фрагменты изображений рисунков 4 и 5, полученные в результате моделирования со стандартной обработкой (а) и с введенной интерполяцией пикселов (б).

Как видно из рисунков 6 и 7, благодаря удвоению числа пикселов по каждой координате с применением интерполяции артефакты дискретизации, хорошо видимые на рисунках (а) в значительной степени устраняются, как иллюстрируют рисунки (б).

а) б)

Рис. 7. Увеличенные фрагменты обработанного изображения рис. 5:
а) обработка с повторением пикселов;
б) обработка с интерполяцией пикселов.

Выводы

Описанная дополнительная обработка позволяет устранить паразитную блочность изображения и ступенчатость наклонных линий без заметной потери

четкости. Эта обработка изображений, генерируемых светочувствительной матрицей камеры, позволяет существенно ослабить помехи дискретизации, вызываемые наложением спектральных составляющих, и тем самым улучшить отношение сигнал-помеха на выходе камеры.

Стандартная схема обработки цифрового изображения приводит к появлению на изображении специфических искажений в виде мозаичности изображения, муаров на периодических структурах, ступенчатости наклонных линий. Причиной этих искажений является дискретная структура цифрового изображения при неидеальных пред- и постфильтрах, свойства которых определяются прямоугольной формой пиксельных площадок свето-чувствительной матрицы в камере и отображающей матрицы в видеомониторе.

Указанные искажения можно существенно снизить, если использовать рациональное построение восстанавливающего постфильтра на выходе тракта обработки в виде комбинации дискретного и аналогового фильтра. Это позволяет простыми средствами улучшить результирующее изображение, предназначенное для наблюдения, т.е. понизить уровень нелинейных искажений дискретизации (вызываемых “ложными частотами”) на 6 и более дБ.

Литература

1. Котельников В.А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи // Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности // Изд. Ред. Упр. Связи РККА. – 1934. – С. 1-19. (См. также УФН. Т. 176, № 7, 2006. – С. 762-770.)
2. Джерри А. Дж. Теорема отсчетов Шеннона, её различные обобщения и приложения // ТИИЭР. Т. 65, № 11, 1977. – С. 53-89.
3. Игнатьев Н.К. Дискретизация и её приложения. – М., 1980. – 284 с.
4. Игнатьев Н.К. К дискретизации сигналов с неограниченным спектром // Электросвязь. № 2, 1960. – С. 71-72.
5. Ваганов С.Е., Хашин С.И. Сравнение алгоритмов удвоения размеров изображения // Моделирование и анализ информационных систем. Т. 23, № 4, 2016. – С. 389-400.

УДК 004.932

Шевчук А.А.
Травина Е.И., к.т.н.

ОСОБЕННОСТИ СЕЛЕКЦИИ ОБЪЕКТОВ ИНТЕРЕСА В МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Рассматривается формирование спектрального признака объекта интереса с целью повышения тактико-технических характеристик многоспектральных систем технического зрения для визуального и автоматического анализа разноспектральных изображений.

В настоящее время пилотируемые и беспилотные летательные аппараты (ЛА) оснащаются многоспектральными системами технического зрения (МСТЗ), оптико-электронные системы (ОЭС) которых содержат несколько датчиков изображений, работающих в разных областях спектра. ОЭС формирует синхронные во времени и юстированные в пространстве изображения наблюдаемой сцены. Обычно МСТЗ регистрирует лучистый поток в следующих областях спектра: видимая область (0,4-0,7 мкм); ближняя инфракрасная (ИК) область (0,7-1,5 мкм); средняя ИК-область (3,0-5,0 мкм); дальняя ИК-область (8,0-12,0 мкм). Причем видимая и ближняя ИК-области могут быть разделены на несколько более узких зон, что позволяет получить множество характеристик наблюдаемых объектов интереса и подстилающей поверхности (фона).

Большинство описанных в литературе подходов для визуального анализа разноспектральных изображений (РИ) применяются, если количество РИ не более трех [1]. В МСТЗ, как сказано выше, только количество областей спектра регистрации четыре, которые, в свою очередь, могут быть разделены на зоны регистрации. Все это приводит к увеличению количества исходных РИ. В результате становится актуальной задача создания способов обработки большого количества РИ.

Использование спектральных признаков объектов и фона (элементов фона) наблюдаемой сцены позволяет увеличить дальность визуального анализа и повысить технические характеристики автоматического анализа объектов интереса.

Основными задачами, решаемыми при помощи МСТЗ ЛА, являются: визуальный анализ изображений и их автоматический анализ (обнаружение, распознавание и автосопровождение).

Принцип обработки нескольких РИ с целью визуального и автоматического анализа заключается в раздельном формировании яркостной *B*- и спектральной *S*-компоненты. Яркостная компонента является носителем информации на изображении, что позволяет считать её основной составляющей, а цветовая компонента её дополняет и уточняет.

Если взять набор из n РИ $I_n = \{i_1, i_2, \ldots, i_n\}$, то яркостная компонента B будет определяться функцией F_B, а спектральная компонента S – функцией F_S, обе функции должны зависеть от исходного набора РИ.

$$B = F_B(I_n);\ S = F_S(I_n); \tag{1}$$

Количество изображений в наборе может меняться. В такой ситуации необходимо, чтобы функции F_B и F_S обеспечивали возможность обработки наборов I_n с разным количеством РИ. Для этого можно использовать такую цветовую модель, в которой описание цвета (тон и насыщенность) отделено от яркости.

Широкое распространение получили следующие цветовые модели с раздельным описанием яркостной и цветовой компонент: *LAB*, *LUV*, *HSV*, *HSL*, *YCbCr*, *YUV*, *YIQ* и др. Эти цветовые модели имеют свои особенности. Например, цвет, представленный в модели *HSV*, зависит от устройства, на которое он будет выведен, так как модель *HSV* – это преобразование модели RGB, которая тоже зависит от устройства. Для получения кода цвета, не зависящего от устройства, лучше использовать аппаратно-независимую модель *LAB* – равноконтрастное цветовое пространство, в котором расстояние между цветами соответствует мере ощущения их различия, т.е. визуальному восприятию и вычисляется по формуле:

$$\Delta E_{Lab} = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2}, \tag{2}$$

где ΔE_{Lab} – цветовое различие между двумя точками; L_1, a_1, b_1 – параметры первой точки; L_2, a_2, b_2 – параметры второй точки.

Для визуального и автоматического анализа РИ необходимо формирование уникального спектрального описания объекта интереса. При анализе *n* РИ становится актуальной задачей распределение цветового тона с целью наибольшего различения объектов интереса.

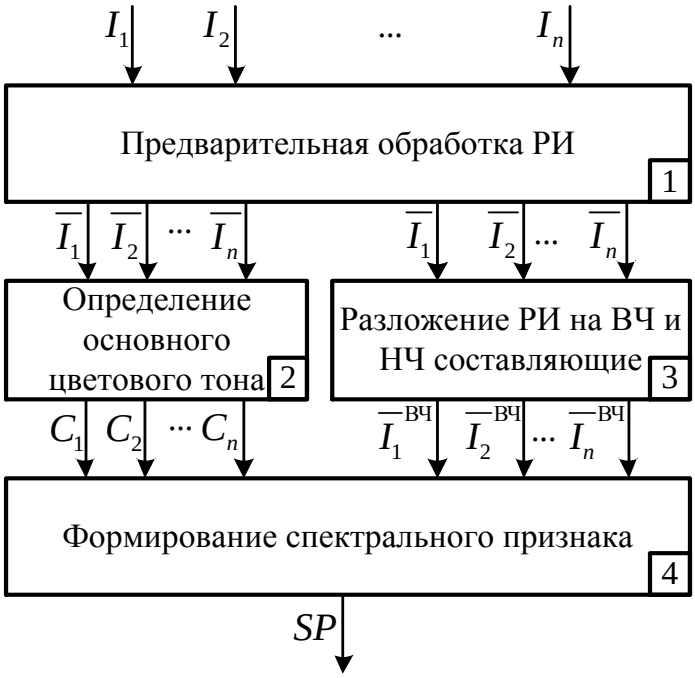


Рис. 1. Способ формирования спектрального признака объекта интереса.

Способ формирования спектрального признака объекта интереса на примере представления цветовой компоненты модели *LAB* показан на рисунке 1.

Предварительная обработка РИ [2] (блок 1) заключается в сортировке исходного набора из *n* РИ I_n по длине волны и нормализации РИ с целью приведения значений к единому диапазону:

$$\overline{I}_1,\ \overline{I}_2,\ \ldots,\ \overline{I}_n,\quad \text{при } \lambda(\overline{I}_1) > \lambda(\overline{I}_2);\ldots\ \lambda(\overline{I}_{n-1}) > \lambda(\overline{I}_n). \tag{3}$$

В блоке 2 выполняется определение основного цветового тона для каждого РИ. Выбранные основные цветовые тоны должны друг относительно друга иметь максимальный цветовой контраст. Например, при использовании цветовой модели *LAB*, выбор направления основного цветового тона для каждого РИ при *n* равном 3 представлен на рисунке 2. Для обеспечения максимального цветового контраста необходимо, чтобы угол между направлениями основного цветового тона был равен 120°.

Для определения локальных контрастов в РИ блок 3 (рисунок 1) должен выполнять разделение каждого РИ на низкочастотную (НЧ) и высокочастотную (ВЧ) составляющую. Затем значения ВЧ составляющей вместе с основным цветовым тоном поступает в блок 4. В блоке 4 ВЧ составляющие каждого РИ проецируются на соответствующие направления основного цветового тона:

$$\text{ПР}_{\substack{\overline{\text{ОТ}_k} \\ k=1...n}} \overline{I_k(i,j)}^{\text{ВЧ}} = \frac{(\overline{I_k(i,j)}^{\text{ВЧ}}, \overline{\text{ОТ}_k})}{\left|\overline{\text{ОТ}_k}\right|}, \qquad (4)$$

где $\overline{\text{ОТ}_k}$ – k-й вектор основного тона; $\overline{I_k(i,j)}^{\text{ВЧ}}$ – ВЧ составляющая k-го РИ.

Спектральный признак SP формируется взвешенным суммированием по всем проекциям.

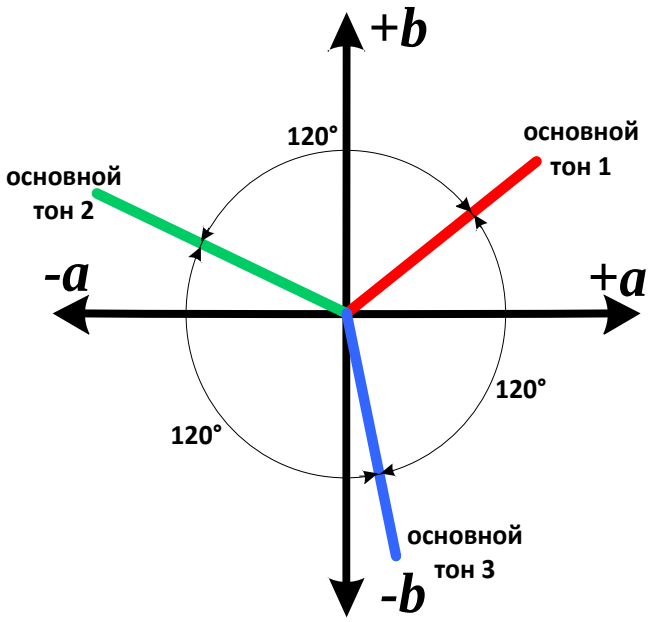


Рис. 2. Выбор основных цветовых тонов для формирования спектрального признака объекта интереса для набора из трех РИ.

Использование SP в качестве спектрального признака в корреляционных системах автоматического анализа РИ позволяет выделить объект по набору из n РИ.

Для примера в качестве объекта интереса можно рассмотреть кубик под номером 1 (рисунок 3) и сформировать для него спектральный признак. Область определения спектрального признака будет иметь размер 16x16 элементов. Спектральный признак *SP* объекта представляет собой матрицы,

размер которых определяется областью определения спектрального признака. При вычислении разностной корреляции по всему полю тестового изображения получается результирующее поле, которое представлено на рисунке 4а.

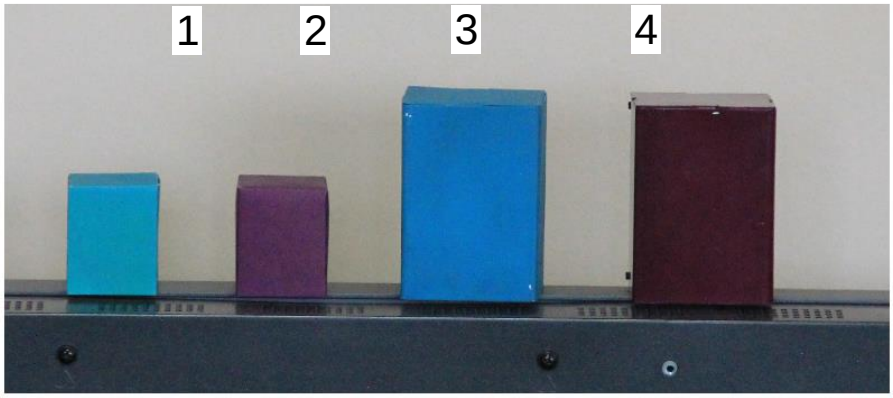


Рис. 3. Тестовое изображение.

Цветовое различие относительно фона для объектов интереса определяется по формуле (4) и представлено в таблице 1.

$$\Delta Esp_{\text{об-фон}} = \sqrt{\left(SP\text{об}_1 - SP\text{фон}_1\right)^2 + \left(SP\text{об}_2 - SP\text{фон}_2\right)^2} \qquad (5)$$

где $\Delta Esp_{\text{об-фон}}$ – цветовое различие между объектом и фоном; $SP\text{об}_1$, $SP\text{об}_2$ – составляющие спектрального признака объекта интереса; $SP\text{фон}_1$, $SP\text{фон}_2$ – составляющие спектрального признака фона.

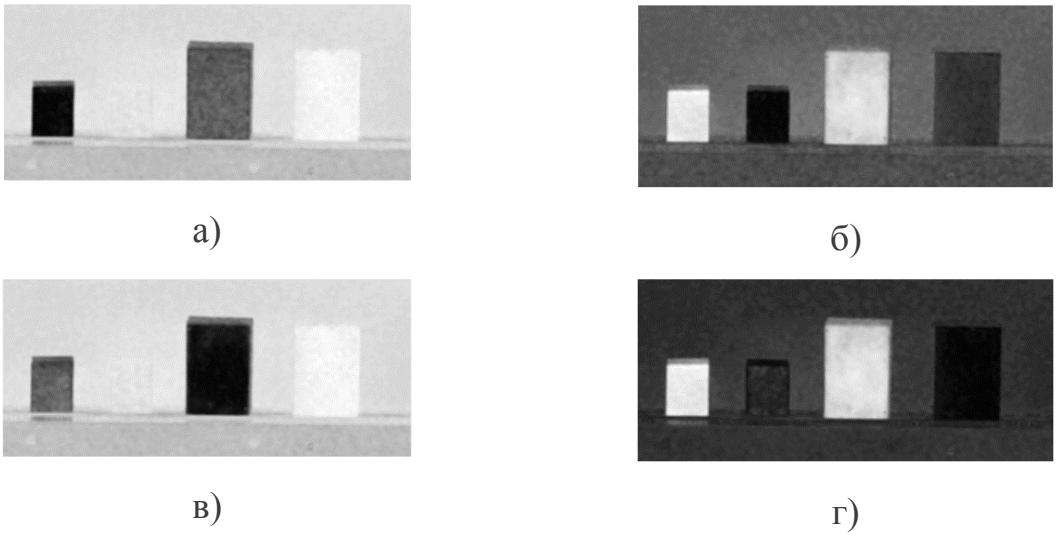


Рис. 4. Разностная автокорреляция спектрального признака. а) для объекта 1; б) для объекта 2; в) для объекта 3; г) для объекта 4.

Таблица 1. Цветовое различие объектов интереса для тестового изображения.

	Объект 1	**Объект 2**	**Объект 3**	**Объект 4**
Цветовое различие $\Delta Esp_{\text{об-фон}}$	22 – 35	10 – 18	26 – 40	7 – 8

Анализ данных, представленных в таблице 1, позволяет сделать вывод о возможности селекции объекта интереса из фона при помощи спектрального признака.

Рассмотрим применение цветового (спектрального) признака в корреляционно-реперном способе слежения за объектом с использованием изображений, полученных в 3-х спектральных диапазонах.

В общем случае решение задачи слежения сводится к поиску такого способа измерения координат объекта, который позволил бы достоверно оценивать местоположение этого объекта на изображении наблюдаемой сцены максимально независимо от его типа, представления и текущей фоноцелевой обстановки.

В рассматриваемом способе слежения реперная система состоит из объектового репера, формируемого в окрестности точки целеуказания, и фоновых реперов, центрами окрестностей которых являются выраженные структурные особенности (углы, пересечения линий и пр.). При этом из-за априорной неопределенности выбора объекта интереса информационная представительность объектового репера является непредсказуемой и, как следствие, его селективные признаки могут быть выражены гораздо слабее, чем у фоновых реперов, или отсутствовать вообще. В конечном итоге это обстоятельство негативно сказывается на качестве автосопровождения.

Естественным решением этой проблемы является коррекция смещений по определению ненадежного объектового репера в зависимости от смещений фона – результата объединения смещений более надежных фоновых реперов. Проведенные исследования показали, что качество слежения напрямую зависит от того, насколько коррекция смещений объектового репера адаптирована к типу объекта интереса. Вариант такой адаптивной коррекции применительно к протяженным объектам описан в [3, 4], при этом существенной особенностью является то, что координатный сдвиг фона вычисляется путем суммирования корреляционных функций фоновых реперов.

Достоверность оценки координат объекта на каждом кадре напрямую зависит от информационной представительности объектового репера. В МСТЗ существует возможность увеличения информационной представительности объектового репера за счет спектральной информации.

Поясним применение этого подхода для слежения с использованием 3-х спектральных каналов (*R*, *G*, *B*) в качестве исходной видеоинформации.

На начальном этапе осуществляется переход из цветового пространства *RGB* в пространство *YCbCr* с целью выделения яркостной (*Y*) и цветовых компонент (*Cr*, *Cg*, *Cb*):

$$\begin{aligned} &Y = k_r R + k_g G + k_b B, \qquad k_r = 0.2126, \quad k_g = 0.7152, \quad k_b = 0.0722; \\ &Cr = R - Y, \quad Cg = G - Y, \quad Cb = B - Y. \end{aligned} \tag{6}$$

Яркостная компонента *Y* содержит основную информацию о структурных особенностях изображения, поэтому именно она является основой для формирования реперной системы.

Увеличение информационной представительности объектового репера достигается формированием цветового репера-дополнения в окрестности точки целеуказания (начальной точки репера) путем отбора фрагментов цветовых компонент *Cr*, *Cg*, *Cb* с выраженными структурными элементами изображения.

Отбор выполняется на основании приведенной в [3] зависимости оценки локальных контрастов от размера окрестности, в пределах которой они вычислялись. Такая оценка локальных контрастов отражает протяженность межэлементных корреляционных связей, определяющих структуру изображения. Например, многочисленные малоразмерные структурные элементы имеют малый радиус корреляции и практически сложно выделимы, поскольку по мере увеличения размера окрестности сглаживаются или исчезают. При этом зависимость оценки локальных контрастов от размера окрестности имеет убывающий характер. В этом случае фрагмент анализируемой цветовой компоненты *x* в формировании цветового репера-дополнения не участвует.

$$x \in \{r, g, b\}, \quad \eta_x = \begin{cases} c_{\max} > c_{\min}: & 1 \\ c_{\max} \le c_{\min}: & 0 \end{cases}; \tag{7}$$

где η_x – признак пригодности цветовой компоненты x; c_{max}, c_{min} – значения оценки локальных контрастов при максимальном и минимальном размерах окрестности.

Последующая обработка сформированного цветового фрагмента практически не отличается от обработки яркостных фрагментов и состоит в следующем.

Во-первых, предварительная обработка каждого фрагмента (яркостного или цветового) заключается в выделении ВЧ составляющей – перепадов яркости/цвета.

Во-вторых, формирование эталона каждого репера представляет собой отбор в его окрестности L элементов с наибольшими значениями яркостных/цветовых перепадов.

В-третьих, вычисление разностных корреляционных функций (КФ) для всех реперов выполняется одинаково. При этом объектовый репер имеет две КФ – результаты корреляционного сопоставления яркостного и цветового эталонов.

Различия заключаются в следующем.

Во-первых, для вычисления координатных смещений объектового репера выполняется суммирование двух корреляционных функций – результатов корреляционного сопоставления яркостного (K) и цветового (K_c) эталонов.

$$\left(\tilde{\alpha}\ ,\tilde{\beta}\ \right) = \arg\min\left\{K\ \left(\alpha,\beta\right)+K_c\left(\alpha,\beta\right)\right\},\quad \left(\alpha,\beta\right)\in\overline{-\delta:\delta}; \tag{8}$$

где $\tilde{\alpha}$, $\tilde{\beta}$ – координатные смещения объектового репера на текущем кадре; δ – размер зоны корреляционного поиска.

Для информационной сопоставимости результаты предварительной обработки фрагментов объектового репера (яркостного и цветового) приводятся к единому диапазону.

Во-вторых, при формировании эталона объектового репера для исходных фрагментов каждой цветовой компоненты x вычисляется цветовой (спектральный) признак $\tilde{m}_x$ как математическое ожидание цвета в окрестности ε точки слежения (y_0, z_0):

$$x\in\{r,g,b\}:\quad \tilde{m}_x = M\left\lfloor C_x\left(\Delta_y,\Delta_z\right)\right\rfloor,\quad \Delta_y = y_0\pm\varepsilon,\ \Delta_z = z_0\pm\varepsilon; \tag{9}$$

Далее на каждом кадре в точке слежения для каждой цветовой компоненты x вычисляются спектральные признаки m_x, а также цветовое рассогласование Rc:

$$\begin{aligned} &x \in \{r, g, b\}: \quad m_x = M\left[C_x\left(\Delta_y, \Delta_z\right)\right], \quad \Delta_y = y_0 \pm \varepsilon, \Delta_z = z_0 \pm \varepsilon, \\ &Rc = \left|m_r - \tilde{m}_r\right| + \left|m_g - \tilde{m}_g\right| + \left|m_b - \tilde{m}_b\right|; \end{aligned} \tag{10}$$

На примере сюжета сближения со взлетно-посадочной полосой (ВПП), полученного в ходе летных испытаний, поясним использование спектрального признака для повышения точности слежения (рисунок 5).

Слева на рисунке 5 приведены кадры последовательности для варианта слежения по яркости (без использования спектрального признака), точка слежения отмечена синим крестом.

Справа на рисунке 5 приведены те же кадры, последовательности, но для варианта с использованием цветовой (спектральной) информации для объектового репера согласно (6-10), положение точки слежения отмечено красным крестом.

Объектом слежения в обоих случаях является фрагмент ВПП с одинаковыми координатами. Приблизительно с 440 кадра наблюдается постепенное экранирование объекта слежения бортом самолета.

Перезапись эталона в это время при яркостном слежении (левая колонка) привела к срыву слежения.

Использование цветовой (спектральной) информации позволило избежать срыва слежения за счет запрета обновления эталонов объектового репера – яркостного и дополнительного цветового в случае превышения цветовым рассогласованием Rc (9) некоторого порогового значения.

Таким образом, применение спектральных признаков является фактором повышения точности и устойчивости слежения при ухудшении фоноцелевой обстановки, а также в тех случаях, когда яркостной эталон объектового репера не имеет достаточной информационной представительности.

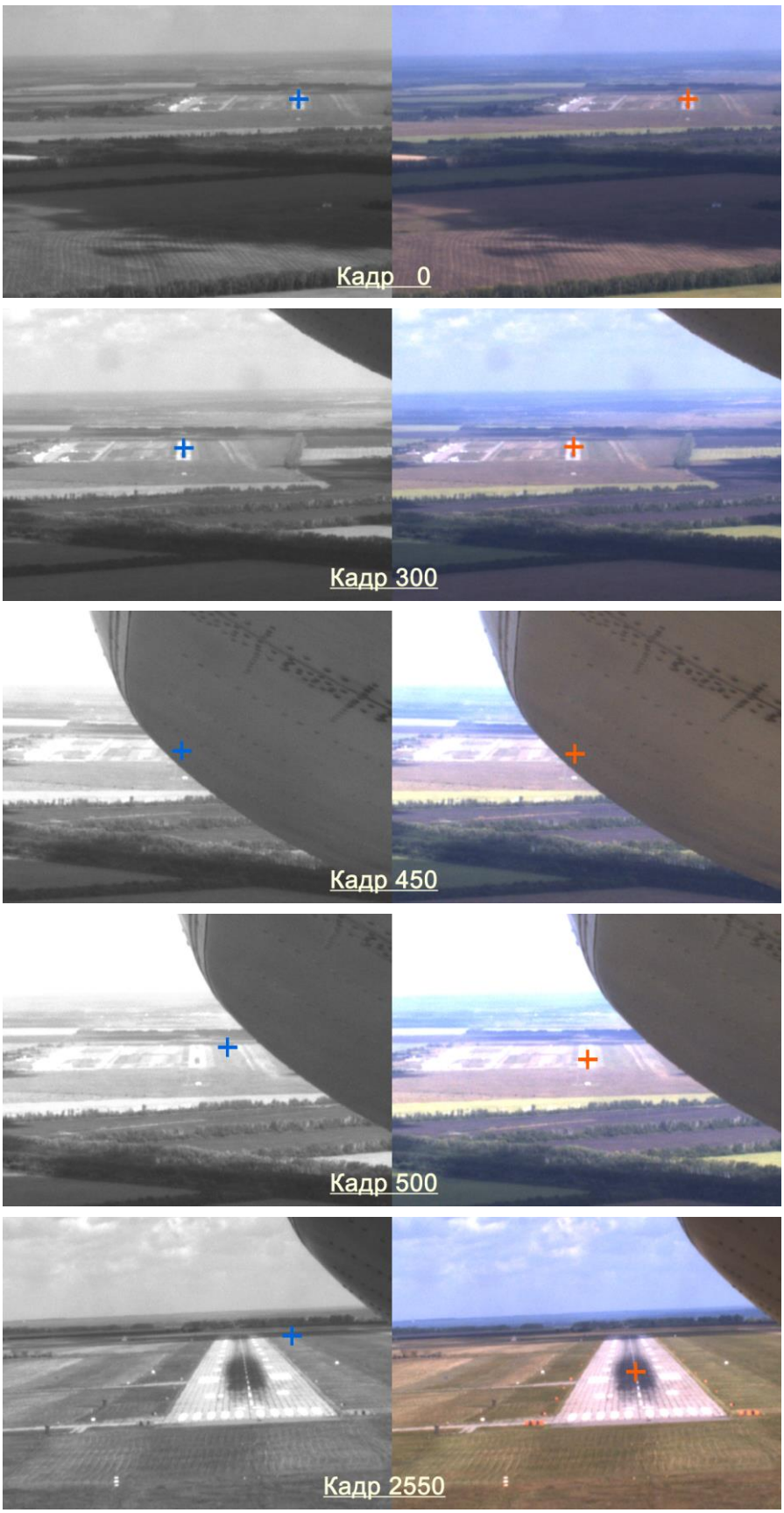


Рис. 5. Пример слежения.

По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод, что использование спектрального признака объекта интереса позволяет при автоматическом анализе набора из *n* РИ контрастировать объект интереса относительно фона, если по каким-либо причинам объект интереса не имеет яркостного контраста с фоном, тем самым качественно повысить точность и устойчивость слежения за объектами.

Кроме того, использование спектральных признаков объектов (элементов объекта) и фона (элементов фона) наблюдаемой сцены позволяет увеличить дальность и сократить время визуального анализа набора из *n* РИ.

Литература

1. Шевчук А.А. Роль цвета и яркости в объединении разноспектральных изображений для визуального анализа объектов // Материалы XIII научно-технической конференции (ЮЗГУ). – Курск, 2017.
2. Шевчук А.А. Информационное наполнение регистрируемых изображений в многоспектральных телевизионных системах // Материалы XIII научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, филиал АО «РКЦ «Прогресс» – «НПП «ОПТЭКС», 2016.
3. Травина Е.И., Шахрай В.И. Повышение устойчивости слежения за протяженными объектами с использованием реперного алгоритма автосопровождения // Техника средств связи. Серия: Техника телевидения. – М., 2016. – С. 65-77.
4. Травина Е.И. Адаптация к виду объекта как средство повышения устойчивости автосопровождения // Материалы XIII научно-технической конференции (ЮЗГУ). – Курск, 2017.

УДК 621.397:535.318

Алимов А.Е., к.т.н.
Шавкунов О.В.
Сагдуллаев Ю.С., д.т.н., проф.
Ковин С.Д., к.т.н.

СПЕКТРОЗОНАЛЬНАЯ ТЕЛЕВИЗИОННАЯ КАМЕРА

В работе рассмотрен принцип построения перспективной спектрозональной телевизионной камеры с использованием двухканальной оптической схемы расщепления входного лучистого (светового) потока, которая обеспечивает формирование трех зональных сигналов изображения в заданном спектральном участке. Сформулированы требования к параметрам объектива, светоделительным зеркалам и оптическим фильтрам.

Введение

В настоящее время в прикладном телевидении широкое применение получают спектрозональные телевизионные камеры, обеспечивающие одновременную регистрацию исследуемого объекта в различных участках спектра электромагнитных волн, включающих ультрафиолетовую (УФ), видимую (ВИ) или инфракрасную (ИК) области спектра. Использование таких камер позволяет повысить эффективность решения задач обнаружения, распознавания и идентификации, так как появляется возможность дифференцирования объектов не только по геометрической форме, но и по их спектральным сигнатурам. Спектрозональные телевизионные камеры находят применение практически во всех сферах жизнедеятельности (медицине и биотехнологиях, робототехнике, военной технике, криминалистике, автомобильной промышленности и т.д.).

На рисунке 1 представлена схема входного оптического звена спектрозональной телевизионной камеры (ТВ камеры) [2]. Оно включает: объектив 1, светоделительные зеркала 2.1, 2.2, оптические фильтры 3.1, 3.2 и матричные фотоприемники (МФП) 4.1, 4.2. Данная компоновка оптических элементов позволяет получать для каждого канала геометрически идентичные изображения регистрируемой сцены (т.е. свободные от эффекта параллакса), но различающиеся по спектральному составу.

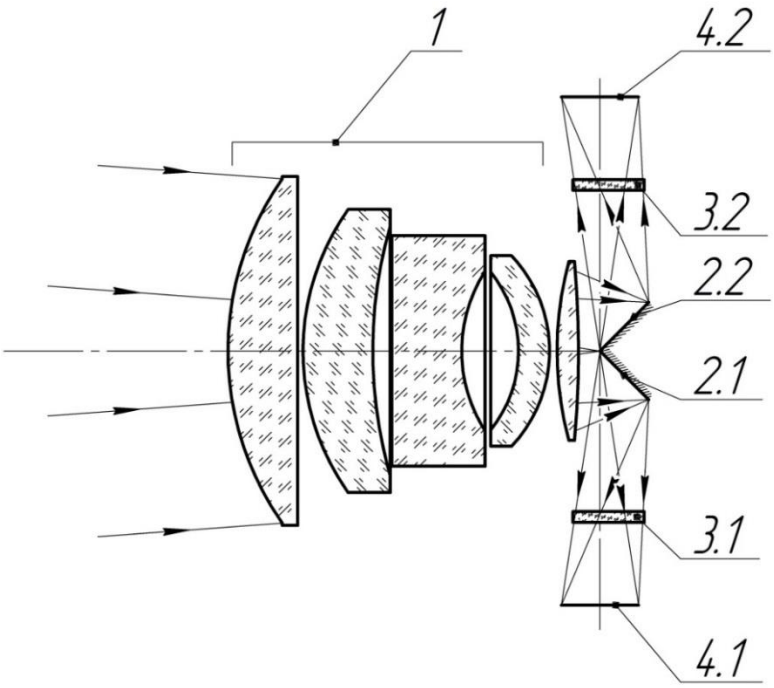


Рис. 1. Схема входного звена двухканальной спектрозональной ТВ камеры.

Светоделительные зеркала (2.1, 2.2) обеспечивают разделение выходящего из объектива (1) потока излучения F по энергетике в требуемой пропорции, а светофильтры (3.1, 3.2), определяют спектральные коэффициенты пропускания двух каналов – $\tau_{\Delta\lambda 1}$, $\tau_{\Delta\lambda 2}$ (рисунок 2). Прошедшее через светофильтры излучение $F_{\Delta\lambda 1}$, $F_{\Delta\lambda 2}$ первого и второго каналов попадает на МФП (4.1, 4.2) и формирует два видеосигнала $U_{\Delta\lambda 1}(t)$, $U_{\Delta\lambda 2}(t)$ соответственно:

$$\begin{aligned} F_{\Delta\lambda 1} &\rightarrow U_{\Delta\lambda 1}(t), \\ F_{\Delta\lambda 2} &\rightarrow U_{\Delta\lambda 2}(t). \end{aligned} \tag{1}$$

При этом, например, первый видеосигнал обеспечивает регистрацию объектов в широком спектральном участке $\Delta\lambda_1 = (\lambda_3 – \lambda_1)$, а второй видеосигнал – в меньшем $\Delta\lambda_2 = (\lambda_2 – \lambda_1)$, где $(\lambda_2 < \lambda_3)$ (рисунок 2). Третий видеосигнал $U_{\Delta\lambda 3}(t)$ формируется в области пропускания $\Delta\lambda_3 = (\lambda_3 – \lambda_2)$, за счет применения операции вычитания видеосигналов (2), полученных в первом и втором спектральных каналах [1]:

$$U_{\Delta\lambda 3}(t) = U_{\Delta\lambda 1}(t) - U_{\Delta\lambda 2}(t) \tag{2}$$

При этом обеспечивается спектральный коэффициент пропускания $\tau_{\Delta\lambda 3}$, представленный на рисунке 2. Следует отметить также, что в канале, который обеспечивает регистрацию объектов в широком спектральном участке, оптический фильтр может отсутствовать, в этом случае спектральный состав будет определяться спектральной чувствительностью МФП.

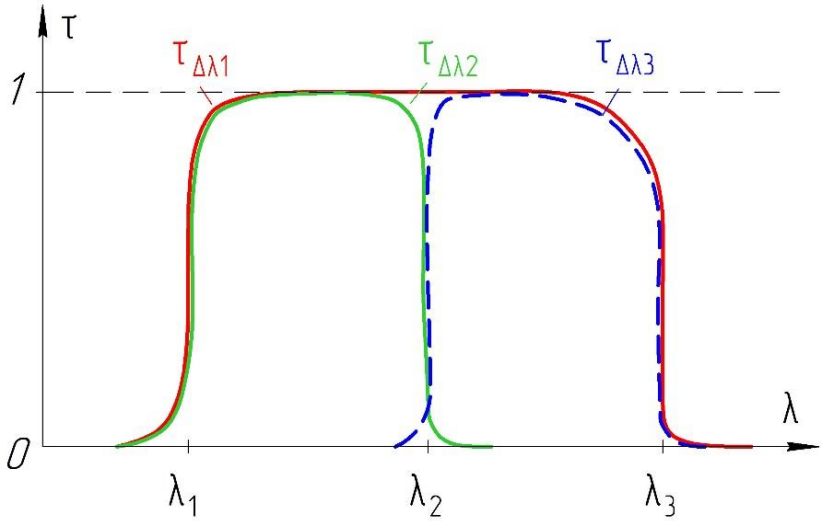


Рис. 2. Спектральные коэффициенты пропускания спектрозональной ТВ камеры.

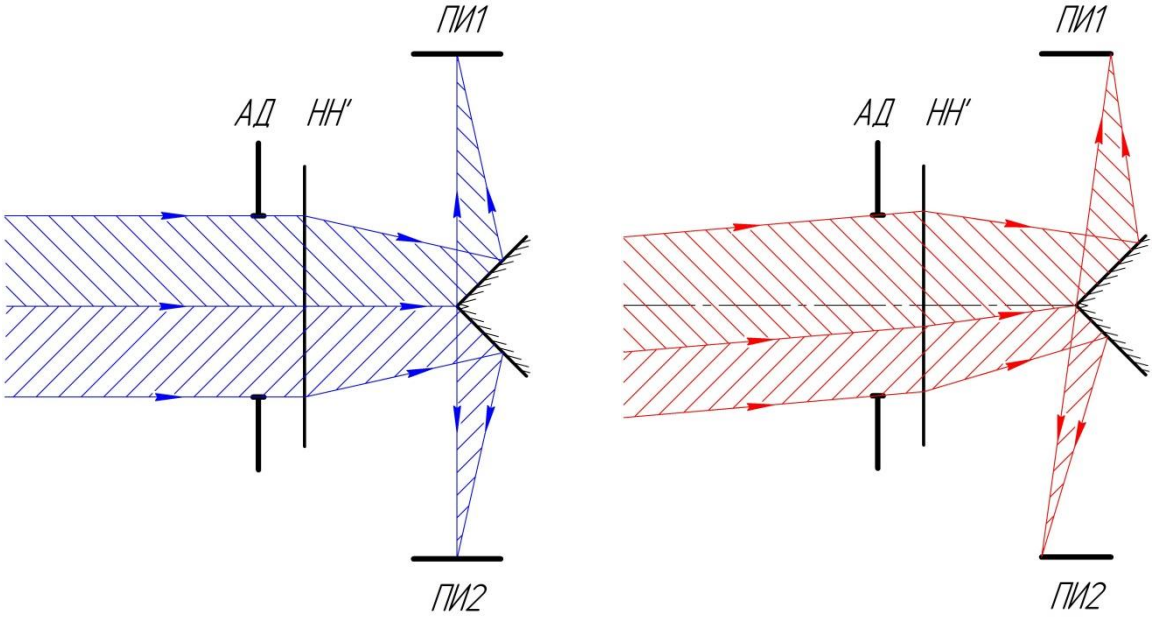
Использование традиционных систем с дихроичными зеркалами или призменными спектроделительными системами [3, 4] не позволит обеспечить формирование трех видеосигналов в таких зонах регистрации лучистого (светового) потока.

Отметим, что рассматриваемая компоновка помимо преимуществ, о которых сказано выше, имеет недостаток, а именно к объективу должны предъявляться дополнительные требования, связанные с расположением апертурной диафрагмы. В данной работе представлены результаты исследования влияния положения апертурной диафрагмы (АД) объектива на распределение освещенности в каналах спектрозональной ТВ камеры.

Распределение освещенности в оптическом звене спектрозональной ТВ камеры

На рисунке 3 показано прохождение осевого и наклонного пучков лучей через объектив (задан главными плоскостями НН’) и АД, дальнейшее их разделение светоделительными зеркалами на два канала и построение ими изображения в плоскостях ПИ1 и ПИ2. Из рисунка видно, что при произвольном положении АД относительно светоделительных зеркал только осевой пучок разделяется на две равные части (рисунок 3а). Наклонные пучки

лучей разделяются неравномерно (рисунок 3б), причем эта неравномерность будет расти прямо пропорционально увеличению угла поля. Таким образом, в ПИ1 и ПИ2 будет наблюдаться значительное перераспределение освещенности между противоположенными краями изображения, которое негативным образом скажется на разрешающей способности камеры, вследствие ограниченности её динамического диапазона.

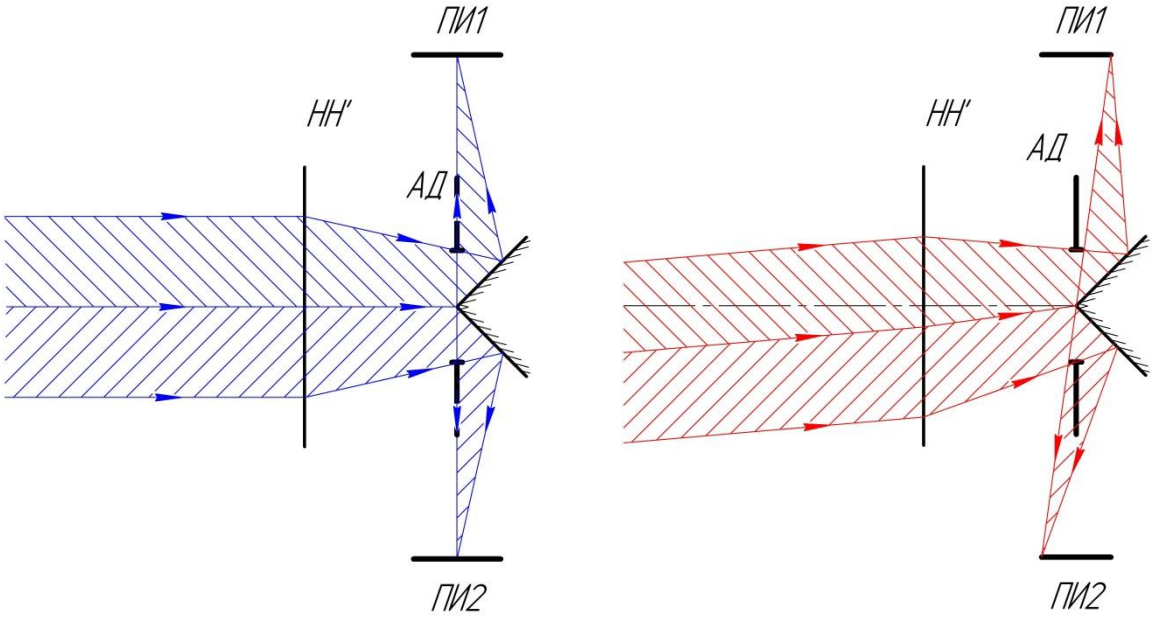


а) осевой пучок б) наклонный пучок

Рис. 3. Разделение пучков лучей зеркальным компонентом при произвольном размещении апертурной диафрагмы.

Устранение описанной выше неравномерности возможно за счет правильного выбора положения АД относительно светоделительных зеркал. Необходимо, чтобы АД совпадала с общей вершиной светоделительных зеркал (рисунок 4). При этом все пучки лучей, проходящие через объектив, разделяются строго поровну вне зависимости от угла поля в пространстве предметов.

Количественную оценку распределения освещенности в плоскостях изображения первого и второго каналов спектрозональной ТВ камеры в зависимости от положения АД объектива получим при помощи программы для автоматизированного расчета оптических систем Zemax [5].

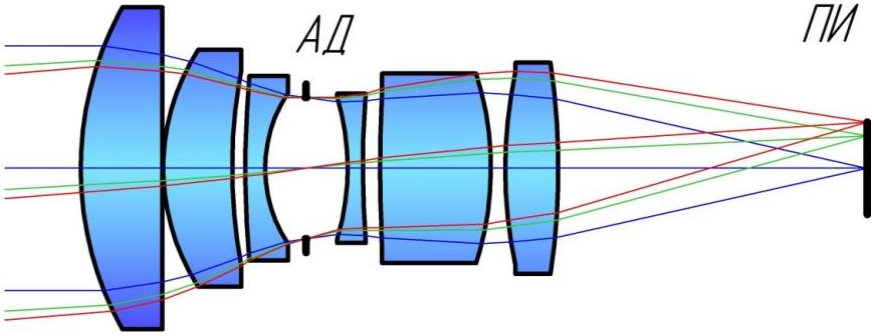


а) осевой пучок б) наклонный пучок

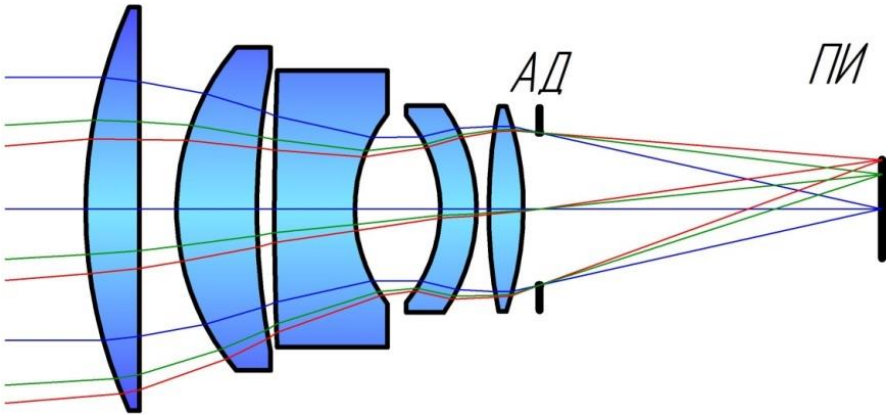
Рис. 4. Разделение пучков лучей зеркальным компонентом при совмещении с ним апертурной диафрагмы.

Далее рассматриваются два объектива с различными оптическими схемами: объектив № 1 (рисунок 5а) – ОКС 6-75-1, состоящий из 6-ти линз, с расположением АД после третьей линзы; объектив № 2 (рисунок 5б) состоит из 5-ти линз, АД находится за последней линзой. Оба объектива имеют одинаковые основные оптические характеристики:

1) фокусное расстояние (f') – 75 мм;
2) относительное отверстие (D/f') – 1:2, 3;
3) линейное поле в пространстве изображений ($2y'$) – 12,1 мм;
4) рабочий спектральный диапазон (весовой коэффициент) – [450 (0,92) – 510 (1,0) – 950 (0,04)] нм.



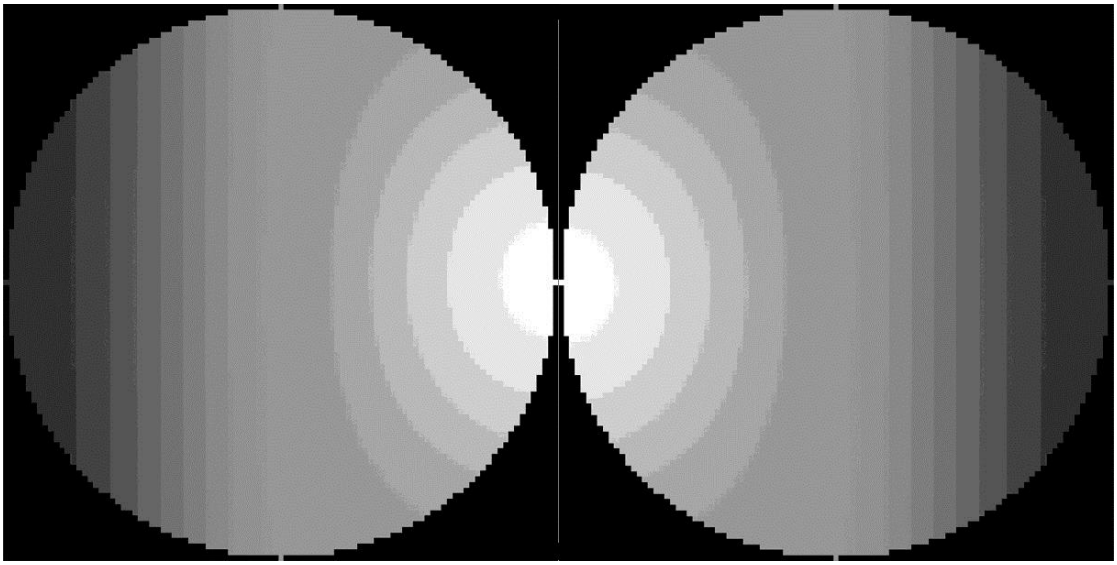
а) объектив № 1



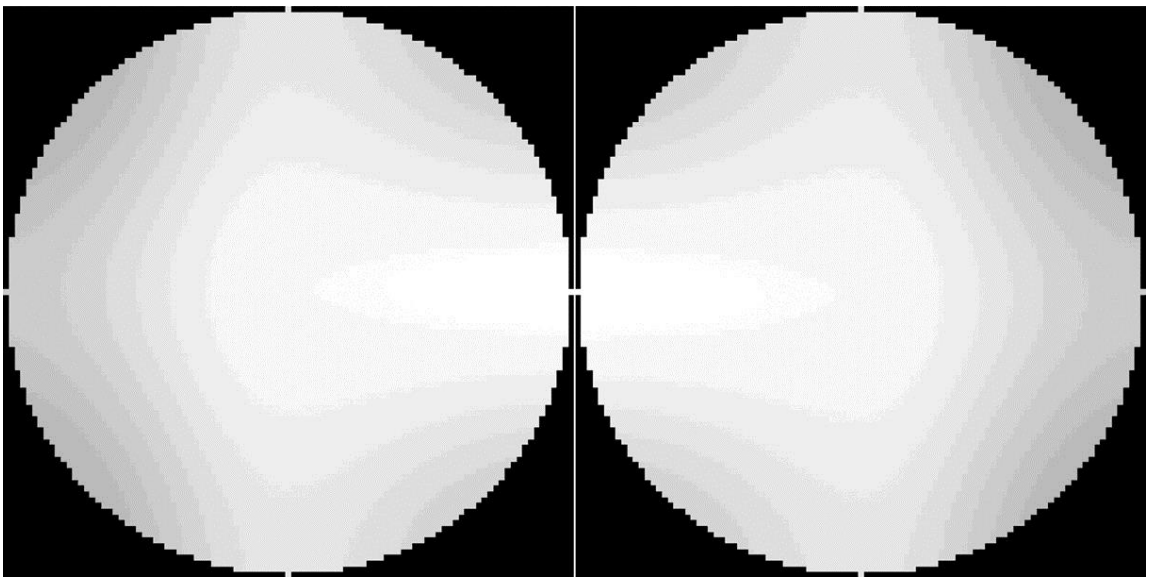
б) объектив № 2

Рис. 5. Объективы с *f'* = 75 мм, *D/f'* = 1:2,3, 2*y'* = 12,1 мм.

На рисунке 6 представлены диаграммы распределения освещенности в плоскостях изображения первого и второго спектральных каналов для объектива № 1 (рисунок 6а) и объектива № 2 (рисунок 6б), полученные в результате моделирования в программе Zemax. В качестве объекта задавался круг с равномерным распределением яркости.



а) объектив № 1



б) объектив № 2

Рис. 6. Распределение освещенности в фокальной плоскости объектива.

На основании сравнительного анализа диаграмм распределения освещенности могут быть сделаны следующие выводы. На рисунке 6а заметен резкий перепад освещенности между левым и правым краями изображения в первом канале. Во втором канале характер распределения освещенности идентичен первому, но имеет зеркальное отражение. Неравномерность освещенности между самой светлой и самой темной точками составляет 82 %.

На рисунке 6б перепад освещенности между левым и правым краями изображения в первом канале значительно меньше и составляет 26 %. Во втором канале характер распределения освещенности идентичен первому и имеет зеркальное отражение. Отметим, что наблюдаемая на рисунке 5б неравномерность связана тем, что в реальной системе невозможно установить физическую диафрагму так, как показано на рисунке 4, потому что она будет перекрывать часть потока излучения (рисунок 4б, второй канал). Поэтому АД можно только максимально приблизить к светоделительным зеркалам. Но даже при таком отступлении АД от идеального расположения изображение будет обладать существенно лучшей равномерностью освещенности, чем при использовании объектива № 1. Таким образом, в спектрозональной ТВ камере с компоновкой, представленной на рисунке 1, предпочтительно использовать объектив, у которого АД располагается за последней линзой.

Заключение

В статье рассмотрена схема построения входного оптического звена перспективной спектрозональной ТВ-камеры, которая обеспечивает формирование трех видеосигналов в различных зонах регистрации лучистого (светового) потока. Проведено математическое моделирование распределения освещенности в плоскостях МФП, формирующих первый и второй видеосигналы спектрозональной ТВ камеры на примере двух объективов с различным расположением АД. Математическое моделирование показало, что для обеспечения меньшей неравномерности освещенности (~ 26 %) необходимо использовать объектив, у которого положение АД совпадает со светоделительными зеркалами. Остаточную неравномерность, при необходимости, можно компенсировать путем шейдинг-коррекции исходных сигналов в каждом из каналов.

Литература

1. Патент № 2604898 РФ. Способ формирования спектрозональных видеосигналов / Ковин С.Д., Сагдуллаев Ю.С. Заявл. 26.06.2015; опубл. 20.12.2016, бюл. № 35.
2. Алимов А.Е., Шавкунов О.В., Ковин С.Д., Сагдуллаев Ю.С. Оптическая система спектрозональной телевизионной камеры для систем технического зрения // XIII Международная научно-техническая конференция «Распознавание-2017», Курск, 2017.
3. Lang H., Bouwhuis G. Colour separation in colour-television cameras // Philips Technical Review. 1962/63. Vol. 24, № 9. P. 263-298.
4. Алимов А.Е., Шавкунов О.В. Оптимизация параметров цветоделительной системы для использования со светосильными объективами // Техника средств связи. Серия: Техника телевидения. – М., 2016. – С. 94-102.
5. ZEMAX Optical Design Program. User’s Guide. Version 10.0. Tucson (Arizona, USA): Focus Software, Incorporated, 2003. 478 p.

УДК 681.5.01

Салата Д.В.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ ВИЗИРНОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрены вопросы математического моделирования системы управления гиростабилизированных платформ на примере многоканальной оптико-электронной визирной системы. Показано соответствие между работой модели и изделия.

Введение

Обеспечение безопасности полетов современных военно-транспортных авиационных комплексов (АК) различного назначения предусматривает размещение в составе их бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) многоканальных оптико-электронных визирных систем (МОЭВС). Такие системы должны обеспечивать выполнение следующих основных задач:

- обзор земной и водной поверхностей с целью обнаружения и распознавания ориентиров и их автоматическое сопровождение;
- прицельное десантирование и сброс специальных грузов днем и ночью;
- контроль попадания сбрасываемого груза на заданную площадку.

Разработка МОЭВС требует рассмотрения вопросов, включающих технические, методологические и организационные аспекты, которые бы в полной мере учитывали современные научно-технические достижения и перспективу их развития на ближайшие десятилетия.

Одним из основных узлов МОЭВС является гиростабилизированная платформа (ГСП). Для оптимизации системы управления ГСП проводится её моделирование. Модель системы управления позволяет исследовать параметры и характеристики ГСП.

Математическая модель системы управления

Для создания математической модели всей системы её можно разбить на отдельные звенья. Структурная схема системы управления ГСП по скорости приведена на рисунке 1. Она включает: 1 – блок формирования сигнала рассогласования (БСР), 2 – блок, усиливающий сигнал рассогласования (УСР), 3 – фильтр низких частот (ФНЧ), предназначенный для подавления

нежелательных высокочастотных помех, 4 – усилитель мощности (УМ), 5 – двигатель с нагрузкой, 6 – датчик угловой скорости (ДУС).

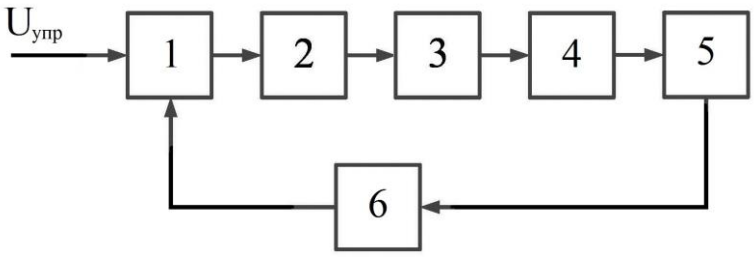


Рис. 1. Структурная схема системы управления МОЭВС.

Сигнал управления $U_{упр}$ пропорционален значению требуемой угловой скорости.

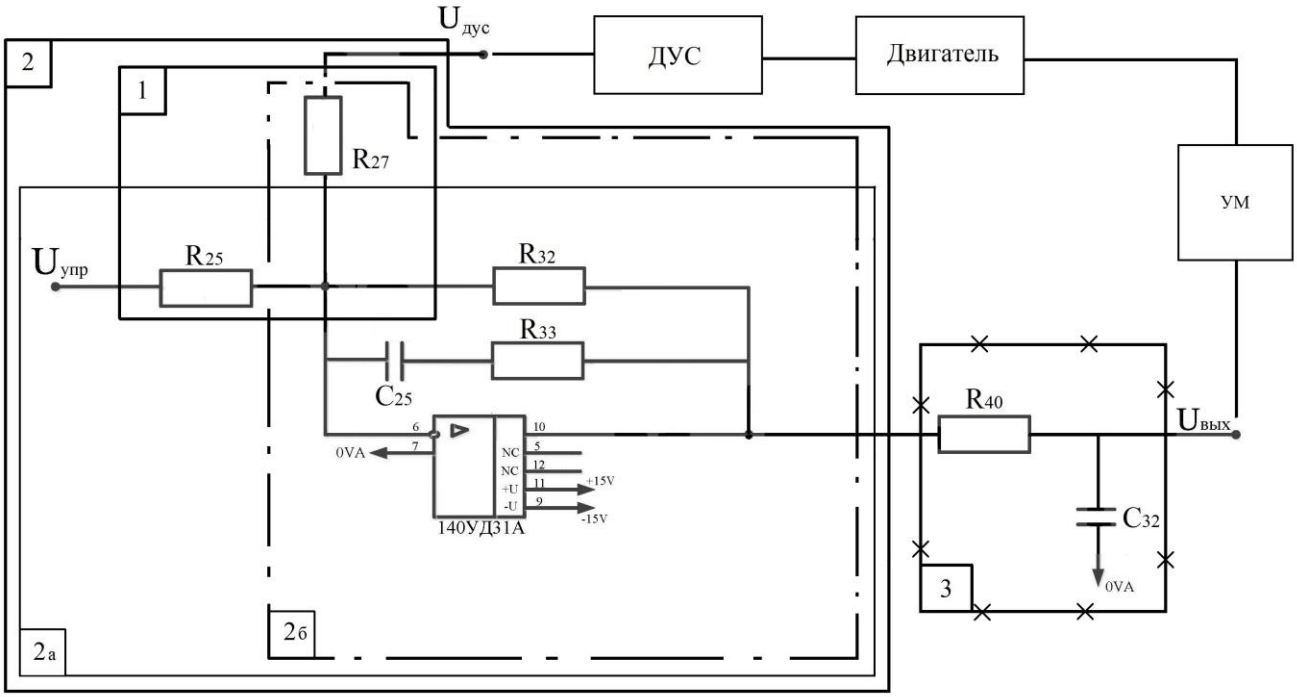


Рис. 2. Схема системы управления.

На рисунке 2 показана схема формирования и усиления сигнала рассогласования. Согласно [1] блок 2а (рисунок 2) описывается передаточной функцией:

$$W(p) = -k\frac{1+T_1 p}{1+T_2 p}, \qquad (1)$$

где $k = \frac{R_{32}}{R_{25}}, T_1 = R_{33}C_{25}, T_2 = (R_{32} + R_{33})C_{25}$, аналогичным образом описывается блок 2б. Согласно [1] блоки 2а и 2б можно описать суммой передаточных функций данных блоков:

$$U_{вых}(p) = -R_0 \sum_{i=1}^{2} \frac{U_{вх.i}(p)}{R_i} = -R_0 \left(\frac{U_{упр}(p)}{R_{25}} + \frac{U_{ДУС}(p)}{R_{27}} \right) = \\ = -\frac{R_0}{R_{25}} U_{упр}(p) - \frac{R_0}{R_{27}} U_{ДУС}(p), \quad (2)$$

где $R_0 = \frac{R_{32}(R_{33}C_{25}p + 1)}{(R_{33} + R_{32})C_{25}p + 1}$. Для МОЭВС-90 номиналы элементов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Номиналы элементов.

Элемент	R_{32}, Ом	R_{33}, Ом	R_{25}, Ом	R_{27}, Ом	R_{40}, Ом	C_{25}, Ф	C_{32}, Ф
Номинал	10^7	10^5	$3{,}01*10^4$	$3{,}01*10^5$	$2.55*10^3$	$2.2*10^{-6}$	$0.15*10^{-6}$

По формуле (2) получаем следующее выражение:

$$U_{вых}(p) = -\frac{73.33p + 333.33}{22.22p + 1} U_{упр}(p) - \frac{7.33p + 33.33}{22.22p + 1} U_{ДУС}(p) \quad (3)$$

.

После усиления сигнал проходит через фильтр. Фильтр присутствует для подавления высокочастотных помех, влияющих на работу двигателя. Фильтр (блок 3) описывается передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{1}{R_{40}C_{32}p + 1} = \frac{1}{0.000383p + 1}. \quad (4)$$

После фильтра сигнал идет на исполнительный механизм. Исполнительным механизмом рассматриваемой системы является двигатель. Правильное описание двигателя является основной задачей для корректного моделирования всей системы. Для этого рассмотрим математическую модель двигателя.

Математическая модель двигателя

В МОЭВС-90 используется двигатель 3 ДБМ-120-1-0,8-3. Он представляет собой бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ) в котором обмотки фаз располагаются неподвижно на статоре, а коммутация фаз осуществляется полупроводниковым инвертором – коммутатором. Силовые ключи коммутатора управляются по сигналу, поступающему с датчика угла. Достоинствами БДПТ являются надежность, долговечность, отсутствие узлов, требующих постоянного обслуживания. Далее по цепи обратной связи (рисунок 1) ДУС измеряется текущая угловая скорость, сигнал которого поступает в БСР, где образуется сигнал ошибки, управляющий двигателем.

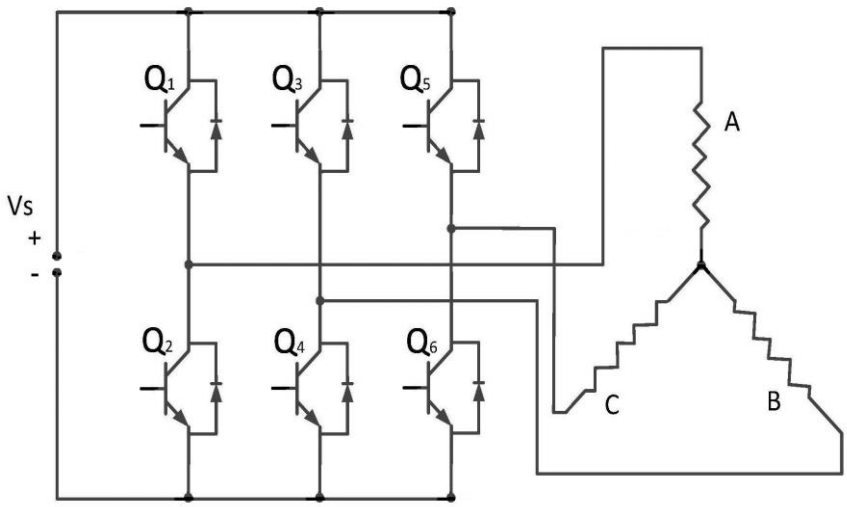


Рис. 3. Схема бесконтактного двигателя постоянного тока.

Электромагнитные процессы в обмотках БДПТ описываются следующими уравнениями:

$$\begin{cases} V_a = R \times i_a + L\dfrac{di_a}{dt} + e_a \\ V_b = R \times i_b + L\dfrac{di_b}{dt} + e_b \\ V_c = R \times i_c + L\dfrac{di_c}{dt} + e_c \end{cases}, \tag{5}$$

$$T_e = k_f \times \omega_m + J\frac{d\omega_m}{dt} + T_L, \tag{6}$$

где: *a,b,c* – фазы двигателя, *V, I, e* – напряжение на фазе, ток и противо-ЭДС соответственно; *R, L* – сопротивление и индуктивность на фазу; T_e – электромагнитный момент двигателя; T_L – момент нагрузки; *J* – момент

инерции, учитывающий как момент инерции ротора двигателя, так и момент инерции нагрузки, приведенный к валу двигателя; ω_m – угловая скорость двигателя.

Электромагнитный момент и противо-ЭДС связаны следующими уравнениями:

$$\begin{cases} e_a = k_e \times \omega_m \times F(\Theta_e) \\ e_b = k_e \times \omega_m \times F\left(\Theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_c = k_e \times \omega_m \times F\left(\Theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \\ T_e = k_t \times \left[F(\Theta_e) \times i_a + F\left(\Theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \times i_b + F\left(\Theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \times i_c \right] \end{cases}, \tag{7}$$

где k_e и k_t – константа противо-ЭДС и константа момента соответственно.

Синхронные магнитоэлектрические двигатели с синусоидальным распределением магнитного поля в зазоре используются для построения вентильных двигателей (ВД).

Синхронные магнитоэлектрические двигатели с трапецеидальным распределением магнитного поля в зазоре используются для построения БДПТ. Для БДПТ функция F – трапецеидальная.

Трапецеидальная функция имеет вид:

$$F(\Theta_e) = \begin{cases} 1, & 0 \le \Theta_e \le \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi}\left(\Theta_e - \frac{2\pi}{3}\right), & \frac{2\pi}{3} \le \Theta_e \le \pi \\ -1, & \pi \le \Theta_e \le \frac{5\pi}{3} \\ -1 + \frac{6}{\pi}\left(\Theta_e - \frac{5\pi}{3}\right), & \frac{5\pi}{3} \le \Theta_e \le 2\pi \end{cases}, \tag{8}$$

Поскольку фазы в БДПТ соединены звездой, можно записать следующее выражение:

$$i_a + i_b + i_c = 0. \tag{9}$$

Систему уравнений (5) можно переписать следующим образом:

$$\begin{cases} V_{ab} = R \times (i_a - i_b) + L\dfrac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b \\ V_{bc} = R \times (i_b - i_c) + L\dfrac{d}{dt}(i_b - i_c) + e_b - e_c \\ V_{ca} = R \times (i_c - i_a) + L\dfrac{d}{dt}(i_c - i_a) + e_c - e_a \end{cases}. \tag{10}$$

Подставив (9) в (10), получим:

$$\begin{cases} V_{ab} = R \times (i_a - i_b) + L\dfrac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b \\ V_{bc} = R \times (i_a + 2i_b) + L\dfrac{d}{dt}(i_a + 2i_b) + e_b - e_c \end{cases}. \tag{11}$$

Умножая первое уравнение из (11) на 2/3L, второе на 1/3L и складывая, получим выражение для тока в фазе А:

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R}{L} \times i_a + \frac{2}{3L}(V_{ab} - e_{ab}) + \frac{1}{3L}(V_{bc} - e_{bc}). \tag{12}$$

Умножая первое уравнение на -1/3L, второе на 1/3L и складывая, получим выражение для тока в фазе В:

$$\frac{di_b}{dt} = -\frac{R}{L} \times i_b + \frac{1}{3L}(V_{bc} - e_{bc}) - \frac{1}{3L}(V_{ab} - e_{ab}). \tag{13}$$

Переходя к операторному описанию Лапласа, перепишем выражения для токов i_a, i_b:

$$i_a = \frac{\frac{2}{3L}(V_{ab} - e_{ab}) + \frac{1}{3L}(V_{bc} - e_{bc})}{p + \frac{R}{L}}, \tag{14}$$

$$i_b = \frac{\frac{1}{3L}(V_{bc} - e_{bc}) - \frac{1}{3L}(V_{ab} - e_{ab})}{p + \frac{R}{L}}. \tag{15}$$

Из уравнения (9) находим выражение для тока i_c:

$$i_c = -i_a - i_b. \tag{16}$$

Зная токи i_a, i_b, i_c находим электромагнитный момент и угловую скорость.

Для двигателя 3 ДБМ-120-1-0,8-3 значения входных параметров приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры двигателя 3 ДБМ-120-1-0,8-3.

Наименование параметра		**Значение**
Напряжение источника питания U (В)		27
Конструктивная постоянная момента C_M (Н*м/А)		0,2
Конструктивная постоянная противо-ЭДС C_E (В*с/рад)		0,2
Момент инерции J (кг*м^2)	без нагрузки	0,001
	с нагрузкой	0,194
Индуктивность L (Гн)		0,00035
Число пар полюсов N		8

БДПТ представляет собой двигатель постоянного тока, в котором механический коллектор заменен полупроводниковым коммутатором. Упрощенная модель двигателя представляет собой двигатель постоянного тока (ДПТ), описываемого системой уравнений:

$$\begin{cases} U_я = R_Я\left(T_Я \dfrac{di_Я}{dt} + i_Я\right) + e_Я \\ J\dfrac{d\omega_m}{dt} = M - M_H \\ \omega_m = \dfrac{d\Theta_m}{dt} \\ e_Я = C_E\omega_m, M = C_M i_Я \end{cases}, \qquad (17)$$

где $L_Я, R_Я, T_Я = L_Я / R_Я$ – индуктивность, сопротивление, электромагнитная постоянная времени якоря; $U_Я, i_Я, e_Я$ – напряжение, ток, противо-ЭДС якоря; $\omega_m, M, M_H, \Theta_m$ – механическая угловая скорость, электромагнитный момент, момент нагрузки, механический угол поворота вала.

Результаты моделирования

Моделирование работы системы управления проводилось в среде MatLab Simulink в режиме вращения с заданной угловой скоростью**.** В блоке БЗВ задавалось значение скорости, с которой должна двигаться платформа. На рисунке 4а показаны зависимости напряжения, снимаемого с ДУС, которые соответствуют угловой скорости движения платформы – 20 град/с, полученные

при моделировании**.** Видно, что работа системы с полным описанием двигателя точнее описывает работу МОЭВС. Однако для приближенных расчетов и грубых оценок можно использовать упрощенную модель двигателя. Для подтверждения корректной работы модели была снята аналогичная характеристика с изделия МОЭВС (рисунок 4б).

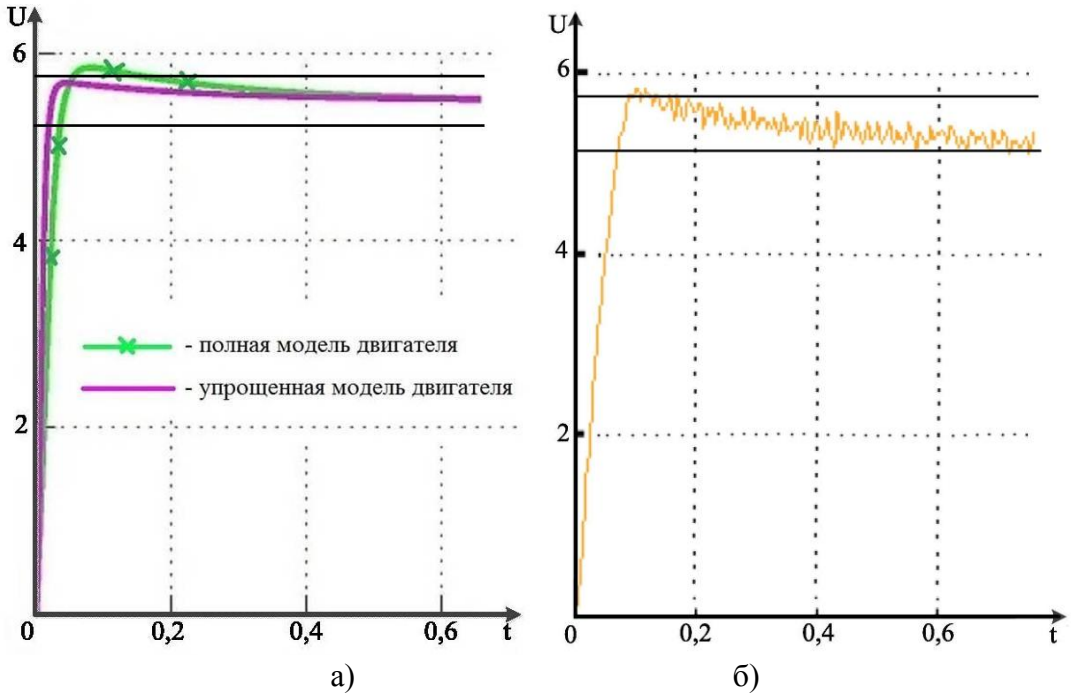


Рис. 4. Переходный процесс по скорости ГСП в режиме отработки входного сигнала:
а – математическая модель МОЭВС, б – изделие. Скорость – 20 град/с.
Погрешность измерений – 5 %.

На рисунке 5 показаны переходные процессы, полученные при моделировании с изделия при угловой скорости – 10 град/с. Результаты моделирования находятся в пределах погрешности измерений.

Для оценки устойчивости системы были построены АЧХ и ФЧХ разомкнутой системы (рисунок 6). Передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$W(p) = -\frac{7.88p + 35.96}{(22.22p+1)(0.000384p+1)(0.0000679p^2 + 0.1358p + 0.04)}. \quad (18)$$

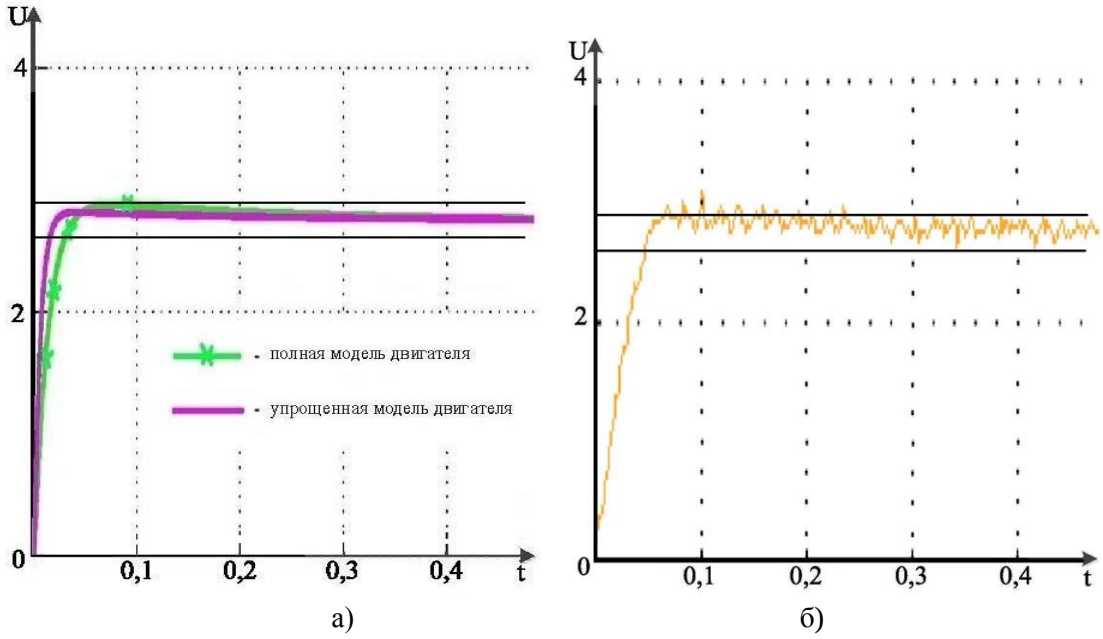


Рис. 5. Переходный процесс по скорости ГСП в режиме отработки входного сигнала: а - математическая модель МОЭВС, б – изделие.
Скорость – 10 град/с. Погрешность измерений – 5 %.

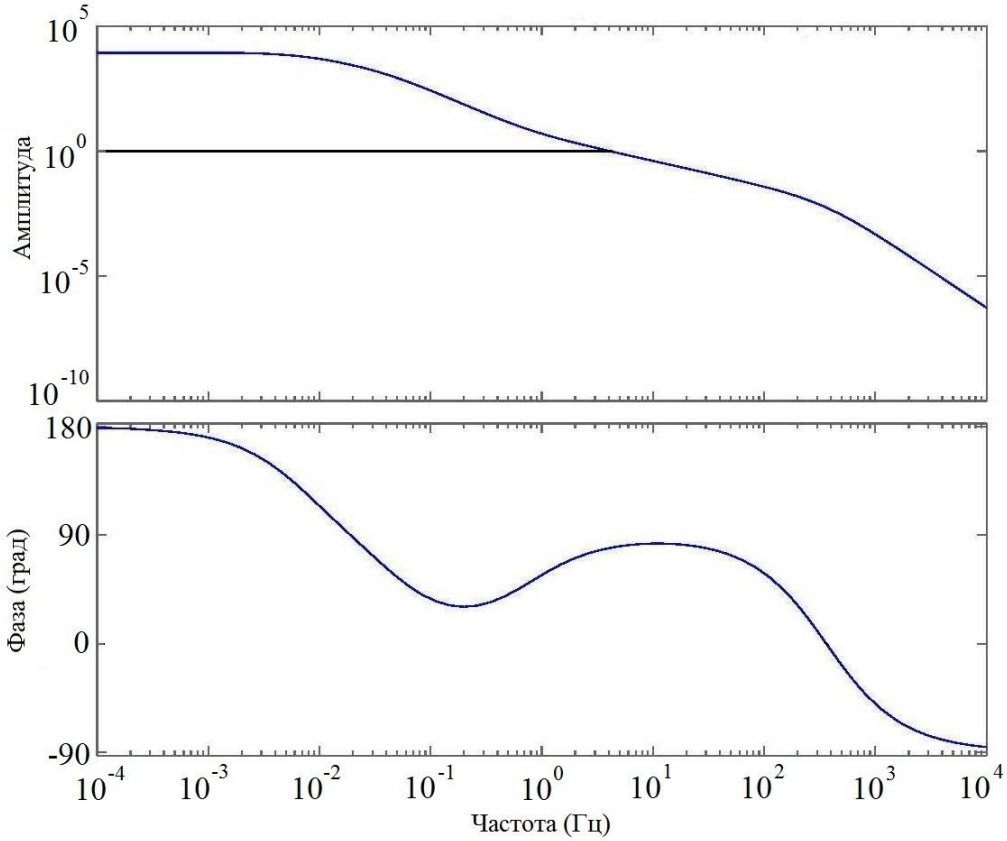


Рис. 6. АЧХ и ФЧХ разомкнутой системы.

Из рисунка 6 видно, что система является устойчивой.

Заключение

Математическая модель системы управления, представленная в данной статье, рассмотрена применительно к МОЭВС. Данная модель позволяет анализировать работу реального устройства, оптимизировать параметры узлов, которые влияют на его работу.

Разработанная модель двигателя достаточно точно описывает режим работы МОЭВС. Имеющее место некоторое несоответствие между предложенной моделью и реальным устройством может быть объяснено тем, что при моделировании не в полной мере были учтены различные помехи, трение между механическими частями изделия и др.

Литература

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – Изд. 4-е перераб. и доп. – СПб., 2003. – 752 с.
2. Овчинников И.Е. Вентильные двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) // Курс лекций. – СПб., 2006. – 336 с.
3. BLDC Motor Modelling and Control – A Matlab/Simulink Implementation Master Thesis work by Stefan Baldursson, May, 2005.

УДК 681.785

Ануфриев А.Ю.
Королев Д.Е., к.т.н.

РАЗРАБОТКА ДВУХКАНАЛЬНОГО ДВУХСПЕКТРАЛЬНОГО КОЛЛИМАТОРНОГО УСТРОЙСТВА

Описано коллиматорное устройство, относящееся к классу контрольно-проверочной аппаратуры, и предназначенное для оценки работоспособности комбинированных двухканальных оптико-электронных систем, чувствительных в спектральных диапазонах от 0,4 до 1,1 мкм и от 8 до 14 мкм.

На сегодняшний день комбинирование каналов приема оптических сигналов различных спектральных диапазонов является одним из путей повышения эффективности применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В этой связи появляется необходимость разработки средств, обеспечивающих контроль работоспособности соответствующих каналов приема оптических сигналов БПЛА. Традиционно такими средствами являются коллиматорные устройства, формирующие изображение тестового сюжета в требуемом спектральном диапазоне с помощью одного из известных методов проекции: эпископического или диаскопического.

В качестве примеров можно привести модульную станцию контроля многоканальных оптико-электронных систем израильской фирмы CI Systems или коллиматор для настройки многоканальной телевизионной системы, описанный в патенте RU 2413267 C2. Первая представляет собой лабораторно-стендовый комплекс, в состав которого входят коллиматорные устройства различных спектральных диапазонов, второй – носимый коллиматор, имеющий два канала, работающих в одинаковых спектральных диапазонах.

Для контроля показателей качества перспективной комбинированной оптико-электронной системы БПЛА, чувствительной в двухспектральных диапазонах авторами разработано коллиматорное устройство (ДКУ), которое в определенной степени объединяет в себе возможности устройств, описанных выше в качестве примера. Одной из особенностей описываемого ДКУ является оригинальное применение термоэлектрического модуля, основанного на эффекте Пельтье, в качестве источника излучения инфракрасного канала.

Принцип построения ДКУ

ДКУ представляет собой двухспектральное коллиматорное устройство, имеющее в своем составе два канала, формирующих тестовые оптические сигналы в двух спектральных диапазонах: от 0,4 до 1,1 мкм и от 8 до 14 мкм соответственно.

Каждый канал ДКУ формирует изображение тестового сюжета в пучке параллельных лучей своего спектрального диапазона методом диаскопической проекции, а системой первичной обработки информации БПЛА осуществляются их репродукции в плоскости чувствительных элементов матричных фотоприемных устройств.

Каждый из каналов ДКУ имеет в своем составе вторичный источник электропитания, источник излучения требуемого спектрального диапазона, тест-объект и оптическую систему, формирующую изображение тест-объекта в пучке параллельных лучей.

Каналы ДКУ представляют собой функционально законченные блоки, которые объединены стыковочным узлом в окончательное изделие, внешний вид которого приведен на рисунке 1. Стыковочный узел представляет собой несущую конструкцию, задающую требуемую ориентацию и взаимное расположение каналов в пространстве и обеспечивающую стыковку с объектом контроля.

Устройство является носимым и может применяться как в лабораторных условиях, так и на открытом воздухе.

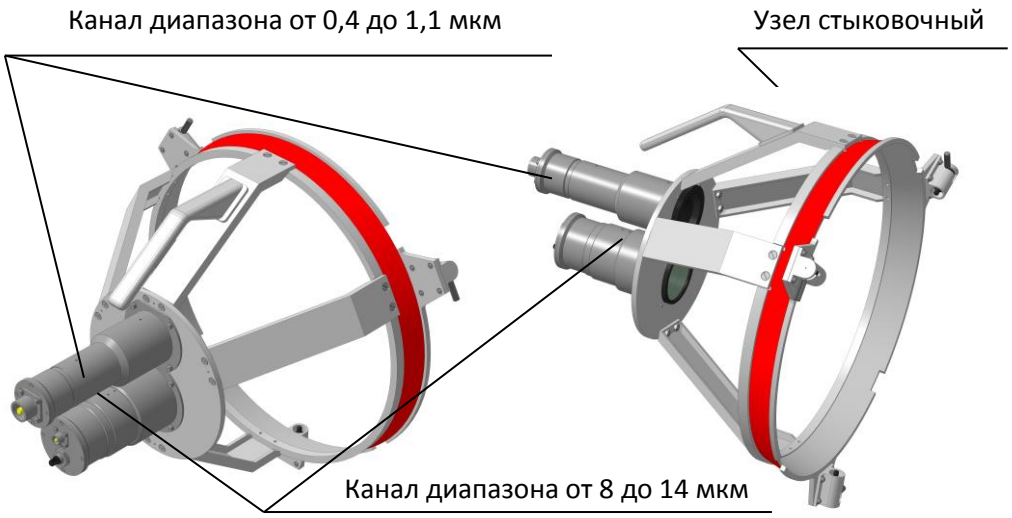


Рис. 1. Двухспектральное коллиматорное устройство.

Канал инфракрасного спектрального диапазона

Как известно, любое нагретое тело излучает электромагнитные волны, спектральное распределение которых описывается формулой Планка с поправкой в виде множителя, называемого спектральный коэффициент излучения [1, 2]. Источниками инфракрасного излучения могут служить штифт Нернста, лазер, глобар, темный излучатель и черное тело (ЧТ). Наиболее широкое применение в качестве источников инфракрасного излучения для контрольно-проверочной аппаратуры нашли ЧТ, так как излучаемую ими мощность можно рассчитать с помощью законов теплового излучения [3, 5].

В России и за рубежом имеется ряд организаций, занимающихся разработкой черных тел для задач метрологии. Конструктивно ЧТ представляет собой, как правило, внушительный агрегат, внутреннее строение которого нетривиально (рисунок 2).

Рис. 2. Конструктивное исполнение черных тел.

В качестве источника электромагнитного излучения инфракрасного канала ДКУ авторами применен термоэлектрический модуль (ТЭМ), основанный на эффекте Пельтье. Термоэлектрический модуль представляет собой две керамические пластины, между которыми размещены термопары, гальванически соединенные между собой таким образом, чтобы обеспечивалось одно направление электрического тока по отношению к керамическим пластинам. При прохождении электрического тока одна пластина ТЭМ нагревается, а другая охлаждается. Таким образом, ТЭМ вполне заменяет собой плоскостное черное тело, учитывая что коэффициент излучения керамики, из которой изготовлены его пластины, для спектрального диапазона от 8 до 14 мкм составляет величину порядка 0,95. Более того, одним из свойств

ТЭМ является смена температурной полярности при смене полярности подаваемого на него напряжения электрического тока, что дает возможность формирования как положительного, так и отрицательного температурного контраста между имитируемыми объектом и фоном.

Производство ТЭМ в настоящее время хорошо освоено в России. Термоэлектрические модули имеют следующие преимущества:

– высокую надежность и практически неограниченный ресурс работы;
– бесшумность;
– нечувствительность к ориентации в пространстве;
– переход с режима нагревания в режим охлаждения за счет реверсирования электрического тока;
– экологическую чистоту.

В описываемом ДКУ применен ТЭМ отечественного производства (компания «Криотерм», г. Санкт-Петербург).

Остановимся подробнее на элементах структурной схемы инфракрасного канала (рисунок 3).

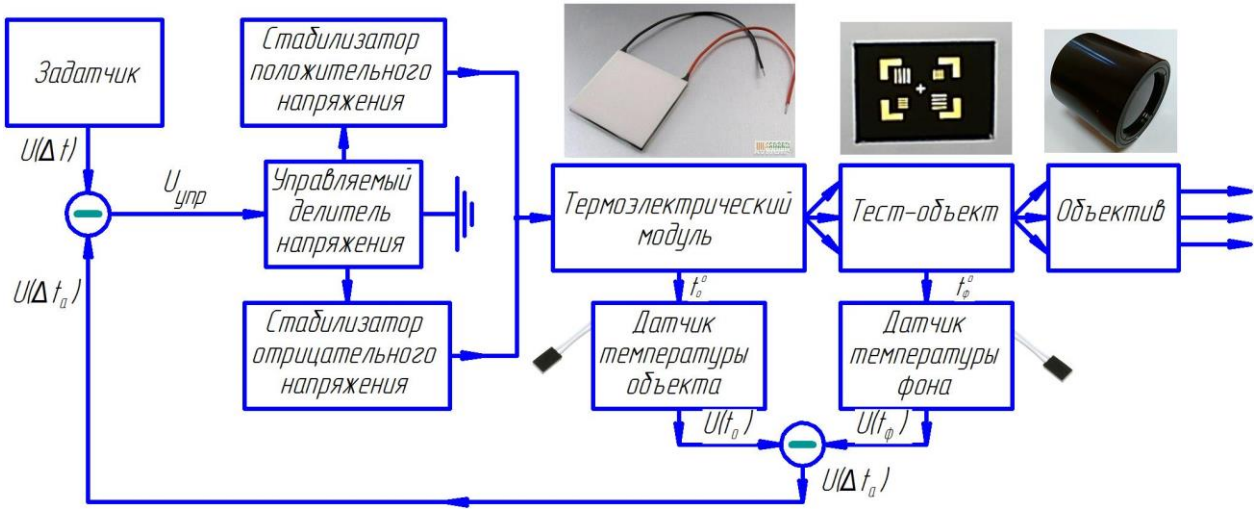


Рис. 3. Структурная схема инфракрасного канала ДКУ.

В канале предусмотрена предустановка разности температур между имитируемыми объектом (за температуру объекта принимается температура поверхности термоэлектрического модуля, обращенная к тест-объекту) и фоном (за нее принимается температура непрозрачной части тест-объекта), осуществляемая в блоке «Задатчик». Контроль текущих температур объекта и фона осуществляется посредством датчиков температуры (терморезисторов), включенных в цепи обратной связи неинвертирующих усилителей.

Для поддержания требуемой разности температур и изменения температурных контрастов применен регулируемый вторичный источник электропитания с изменяемой полярностью [4].

Тест-объект (рисунок 4) представляет собой металлическую пластину с сюжетом, выполненным на ней механическим способом (лазерной резкой). Сторона тест-объекта, обращенная к объективу покрыта глубокоматовой эмалью черного цвета, сторона же, обращенная к ТЭМ, обработана пастой ГОИ и выполнена без покрытия. Сюжет тест-объекта содержит штриховые миры, позволяющие оценивать показатели качества изображения, формируемого соответствующим приемным каналом оптико-электронной системы БПЛА. В описываемом устройстве штриховые миры имеют частоту 0,080 и 0,125 пер/рад.

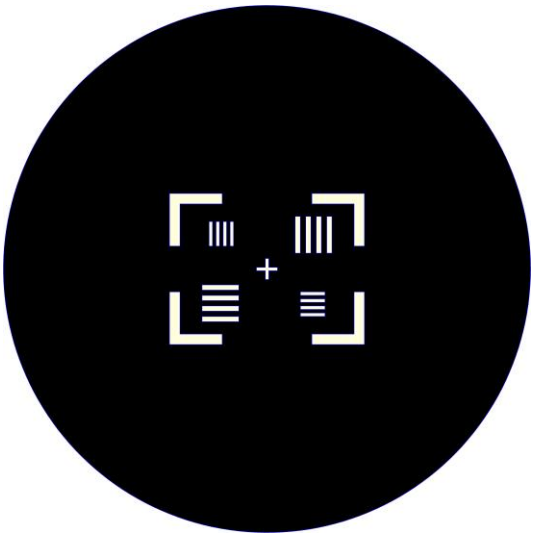


Рис. 4. Тест-объект инфракрасного канала УКДС.

Оптическая часть канала состоит из серийно выпускаемого атермального объектива, предназначенного для работы в спектральном диапазоне от 8 до 14 мкм, и формирующего изображение тест-объекта, расположенного в его фокальной плоскости, в пучке параллельных лучей.

Канал спектрального диапазона от 0,4 до 1,1 мкм

Составные части канала спектрального диапазона от 0,4 до 1,1 мкм, структурная схема которого приведена на рисунке 5, традиционны.

Рис. 5. Структурная схема канала спектрального диапазона 0,4-1,1 мкм.

Вторичный источник электропитания представляет собой преобразователь номинала первичного напряжения электропитания в требуемый номинал вторичных напряжения и тока, источник излучения видимого спектрального диапазона – светодиод с требуемой цветовой температурой, тест-объект – телевизионная испытательная таблица (рисунок 6), сюжет которой выполнен на нанесенной на стеклянную подложку металлической пленке методом фотолитографии или лазером и расположен в фокальной плоскости серийно выпускаемого объектива, который рассчитан на спектральный диапазон от 0,4 до 1,1 мкм и, аналогично объективу инфракрасного канала, формирует изображение сюжета в пучке параллельных лучей.

Рис. 6. Телевизионная испытательная таблица.

Как в отечественных, так и зарубежных источниках упоминание о применении светодиодов в качестве источников излучения коллиматорных устройств крайне отрывисто, несмотря на их очевидные преимущества по сравнению с лампами накаливания: меньшее энергопотребление и массо-габаритные характеристики, более высокая надежность, долговечность и срок

службы, а также существенно меньшее тепловыделение, что актуально при наличии инфракрасного канала, так как снижается уровень возникающих в нем помех вследствие теплопередачи из-за работы канала диапазона 0,4-1,1 мкм.

Заключение

Описанное двухспектральное коллиматорное устройство обеспечивает контроль работоспособности двухканального двухспектрального модуля-корректора БПЛА. Тем не менее, независимая конструкция каналов позволяет с минимальными доработками применять ДКУ для контроля и других изделий.

ДКУ может быть полностью выполнено на отечественной элементной базе.

Применение ТЭМ Пельтье и светодиода в качестве источников излучения позволяет упростить конструкцию каналов, снизить стоимостные и массо-габаритные характеристики, повысить надежность устройства в целом. Также использование ТЭМ обеспечит формирование тестовых изображений с различным контрастом без механических вмешательств в конструкцию ДКУ.

Литература

1. Ллойд Дж. Системы тепловидения. – М.: Мир, 1978.
2. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. – М.: Мир, 1988.
3. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Андреев А.Л., Польщиков Г.В. Источники и приемники излучения. – СПб.: Политехника, 1991.
4. Источник питания с плавным изменением полярности / под. ред. Алексеева В.В. Журнал «Радиоконструктор». № 1, 2000.
5. Chrzanowski K. Testing Thermal Imagers. Practical guidebook, Military University of Technology, Warsaw, 2010.

УДК 621.397

Мещеряков А.Л.

НАЗЕМНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВИДЕО-АЭРОСЪЕМКИ

Рассматриваются мобильные комплексы российской разработки для обеспечения информационного взаимодействия беспилотных модулей высотного видеонаблюдения и наземных служб.

Наземные комплексы информационного обеспечения видео-аэросъемки (НКИО ВА) предназначены для обеспечения информационного взаимодействия модуля высотного видеонаблюдения – высотной телекоммуникационной платформы (ВТП) с заинтересованными службами на земле. Взаимодействие может осуществляться в широком спектре используемых сигналов. К первому классу взаимодействия относятся платформы на базе свободных (не связанных механически с землей) аэростатов и дирижаблей, пилотируемых и беспилотных самолетов и вертолетов, а также спутниковых систем. Ко второму – платформы, включающие в себя высотные комплексы на базе аэростатов или аэродинамических летательных аппаратов, соединенных с наземным модулем привязным кабелем-тросом.

Следует отметить, что в последние годы во всем мире ведутся интенсивные разработки широкополосных беспроводных сетей с использованием телекоммуникационных высотных платформ различного назначения способных конкурировать с орбитальными спутниковыми системы связи. В связи с этим разработка мобильных наземных комплексов информационного обеспечения приобретает особую актуальность и новизну.

Передвижной пункт управления (ППУ)

С 2000 года ЗАО «МНИТИ» разрабатывает и изготавливает быстро развертываемые автономно функционирующие мобильные телевизионные комплексы различного назначения. В 2011 году был разработан, изготовлен, испытан и передан в эксплуатацию передвижной наземный пункт управления, выполненный на базе автомобиля высокой проходимости. Рабочий отсек ППУ показан на рисунке 1.

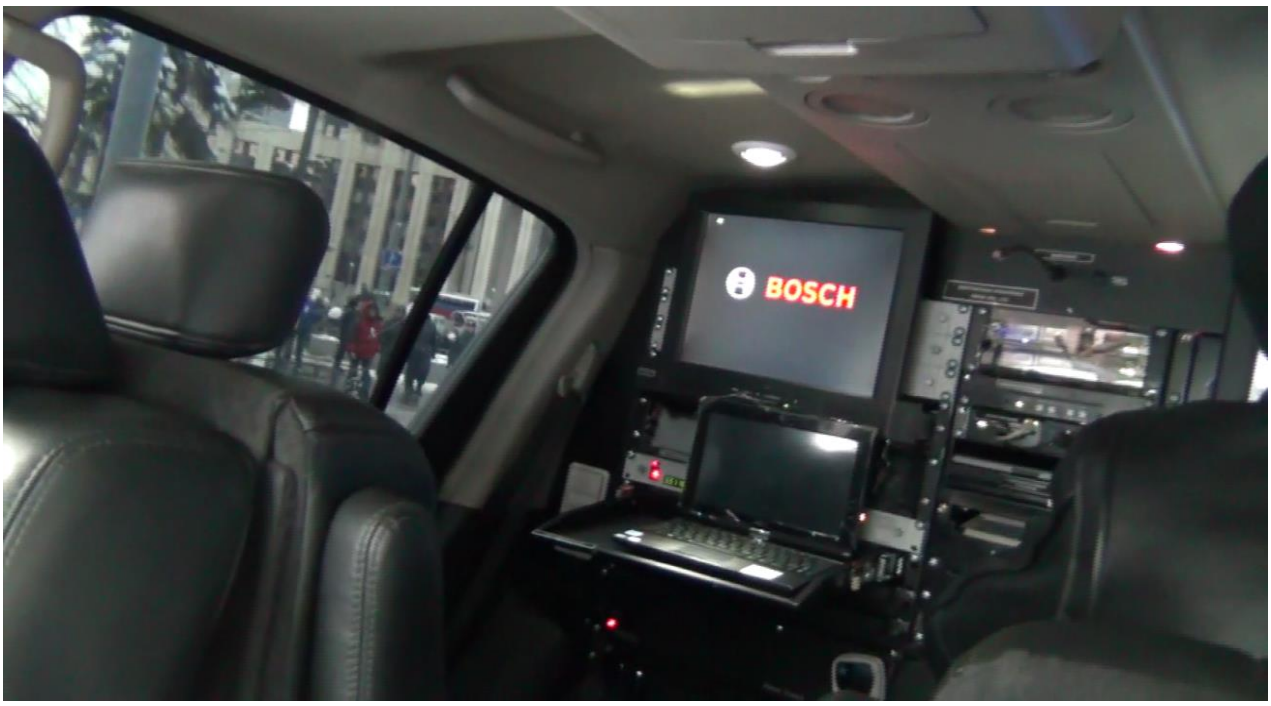


Рис. 1. Рабочий отсек ППУ.

Комплекс ППУ предназначен для обеспечения специалистов необходимой оперативной видеоинформацией с места событий для выработки, принятия и осуществления своевременных эффективных действий.

Комплекс ППУ может применяться следующим образом:

- при проведении специальных мероприятий по борьбе с терроризмом, в период возникновения, ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечения правового режима чрезвычайного положения;
- при обеспечении охраны общественного порядка, во время проведения массовых, общественных и праздничных мероприятий.

Сбор и отображение видеоинформации осуществляется с использованием следующих технических средств:

- гиростабилизированной оптико-электронной видеосистемы, установленной на вертолете и работающей под управлением изделия. Прием видеосигнала с вертолета осуществляется по цифровой радиолинии связи с модуляцией QPSK в диапазоне частот 2…2,5 ГГц с использованием антенн скрытно установленных в багажнике на крыше изделия. Для увеличения дальности приема до 40 км, в дополнение к четырем антеннам, установленным в багажнике, используются еще две

направленных панельных антенны, устанавливаемых на телескопическую мачту;

- компактных беспроводных носимых комплектов видеонаблюдения, в том числе для скрытой видеосъемки, выполненных на основе нательных операторских жилетов, которые обеспечивают беспроводную цифровую передачу видеоизображения на расстояние до 400…500 метров;
- купольной видеокамеры наружного видеонаблюдения, расположенной на телескопической мачте и управляемой с рабочего места оператора;
- видеосервера с качеством записи 720x576 точек при 25 кадрах в секунду, обеспечивающего одновременную запись и воспроизведение любого источника видеосигнала;
- автомобильного видеорегистратора, обеспечивающего запись видеоинформации, в том числе при движении автомобиля.

Для отображения видеоинформации используются видеомониторы, расположенные в стойке на рабочих местах оператора и руководителя в салоне автомобиля. С целью анализа специалистами видеоинформации на местах событий в состав изделия включены выносной видеомонитор диагональю 42 дюйма, ноутбук для управления видеосервером изделия и подачи видеоинформации на выносной видеомонитор.

Схема применения комплекса приведена на рисунке 2.

Принятый ППУ в реальном времени по скоростной (до 3,7 Мб/с) широкополосной цифровой радиолинии с борта вертолета телевизионный сигнал и видеосигнал с других источников архивируются и передаются в ситуационный центр для оценки событий по результатам видеомониторинга и принятия соответствующих решений.

Передача видеоинформации в ситуационный центр осуществляется в режиме реального времени по следующим каналам связи:

- беспроводная связь широкополосного доступа стандарта IEEE 802.11 на расстоянии до 5 километров при условии прямой видимости;
- спутниковая связь Inmarsat BGAN.

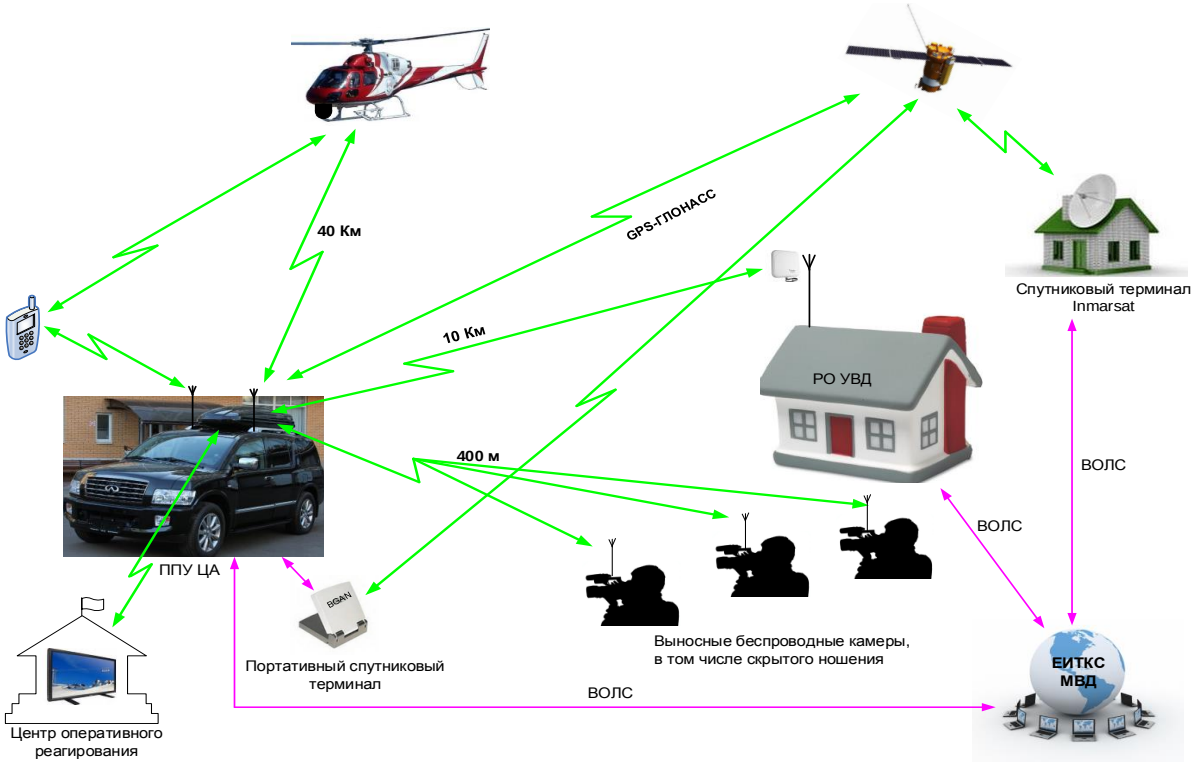


Рис 2. Применение комплекса ППУ.

В качестве средств связи и контроля эфира в изделии используются:

- средства УКВ-радиосвязи диапазонов (136-174) МГц, (403-470) МГц, предназначенные для обеспечения оперативного взаимодействия ППУ и вертолета;
- сканирующий радиоприемник для мониторинга радиоэфира с диапазоном сканирования до 5,5 ГГц.

Комплекс оснащен навигационными системами ГЛОНАСС и GPS.

Электропитание аппаратуры изделия осуществляется либо от внешней электросети 220 В, либо от выносного генератора мощностью 3,0 кВА (8 часов работы), либо от бортовой сети автомобиля.

Испытания изделия проводились на аэродроме. В ходе испытаний экспериментально была проверена дальность приема телевизионного сигнала с камеры вертолета по цифровой радиолинии, а также работа радиосвязи. Работа изделия была проверена как в развернутом стационарном положении, так и в движении. Проведение испытаний ППУ показано на рисунке 3.

Рис. 3. Испытания изделия ППУ.

В мае 2012 года изделие демонстрировалось на московском международном салоне «Комплексная Безопасность 2012», где получило высокую оценку специалистов-посетителей выставки и было отмечено дипломом.

В настоящее время опытный образец изделия успешно эксплуатируется.

Наземный комплекс информационного обеспечения видео-аэросъемки (НКИО ВА) «Скорпион»

В ЗАО «МНИТИ» был разработан, изготовлен и испытан НКИО ВА, выполненный на базе специального автомобиля высокой проходимости «Скорпион-2М». Внешний вид НКИО ВА «Скорпион» показан на рисунке 4.

Решаемые задачи:

НКИО ВА «Скорпион» предназначен для сбора, регистрации и передачи по различным каналам связи видеоинформации Full HD качества, полученной от различных источников из состава комплекса. В том числе от следующих источников видеоинформации: с борта вертолета; от операторов беспроводных комплектов тележурналистики; от малогабаритного беспилотного летательного аппарата (БПЛА); от системы спутникового ТВ вещания (при трансляции подготовленных, либо ретрансляции спутниковых ТВ программ). А также комплекс предназначен для обеспечения звукового вещания аудиоинформации на большие расстояния.

Рис. 4. НКИО ВА «Скорпион».

Состав комплекса:

- широкополосная цифровая радиолиния (приемная часть) для связи с вертолетом;
- купольная системы видеонаблюдения для охраны периметра;
- беспроводные комплекты тележурналистики (2 шт.), выполненные в форме операторских жилетов;
- спутниковое приемо-передающее оборудование;
- телевизионное передающее устройство;
- оборудование звукового вещания;
- комплект антенно-фидерных устройств;
- аппаратура радиосвязи;
- оборудование контроля и управления;
- навигационное оборудование;
- оборудование электропитания;
- оборудование беспилотного летательного аппарата (привязного, либо автономного) с камерой видеонаблюдения на гиростабилизированной платформе;
- спец. автомобиль высокой проходимости «Скорпион-2М».

Рабочие места операторов комплекса показаны на рисунке 5.

Рис. 5. Рабочие места операторов комплекса.

Основные ТТХ:

Дальность действия радиолинии комплектов тележурналистики (при обеспечении прямой видимости) – до 1000 м. Видеоинформация передается в формате Full HD;

Дальность действия вертолетной цифровой радиолинии – до 40 км при условии прямой видимости. Видеоинформация передается в формате Full HD;

Дальность звукового вещания – до 1 км;

Уровень звукового давления на расстоянии 1 метра от излучателя – 140 дБ;

Мощность передающего РВ-устройства УКВ диапазона – 500 Вт (один канал).

Мощность передающего ТВ-устройства ДМВ диапазона – 100 Вт (2 канала: открытый или закрытый – служебный);

Дальность ТВ, РВ вещания передающих ТВ, РВ устройств – до 12 км.

Высота подъема привязного летательного аппарата – до 75 м;

Дальность управления автономным летательным аппаратом – до 10 км.

Опытный образец изделия НКИО ВА «Скорпион» приведен на рисунке 6.

Рис. 6. Опытный образец НКИО ВА «Скорпион».

Испытания опытного образца изделия НКИО ВА «Скорпион» проводились на всероссийском этапе международных соревнований летчиков – «Авиадартс 2015» на полигоне «Погоново». Испытания комплекса НКИО ВА «Скорпион» показаны на рисунке 7.

Технические решения, примененные в представленных наземных комплексах, позволяют использовать их как в стационарных условиях, так и в движении.

Рис. 7. Испытания комплекса НКИО ВА «Скорпион».

При этом переданный с борта вертолета (либо с беспилотного летательного аппарата) на наземный комплекс сигнал видео-аэросъемки с QPSK модуляцией принимается четырьмя независимыми пространственно разнесенными радиоканалами. Затем методом дифференциально-взвешенного суммирования компенсируется многолучевость, переотражения и интерференционные затухания сигнала, возникающие при распространении. При этом стабильный помехоустойчивый прием видеосигнала в условиях городской застройки и при движении наземного комплекса обеспечивается за счет использования в изделии широкополосной системы связи (ШПСС) с пространственно разнесенным приемом на установленные в верхней части транспортной базы антенны.

На рисунке 8 показана антенна радиоканала и её частотная характеристика КСВН.

Выбор системы связи для радиолинии между вертолетом и наземным комплексом был сделан в пользу ШПСС. Это обусловлено одним из основных достоинств систем связи с широкополосным сигналом (ШПС), обеспечивающих надежный прием информации при воздействии мощных помех, когда отношение сигнал-помеха на входе приемника может быть много меньше единицы.

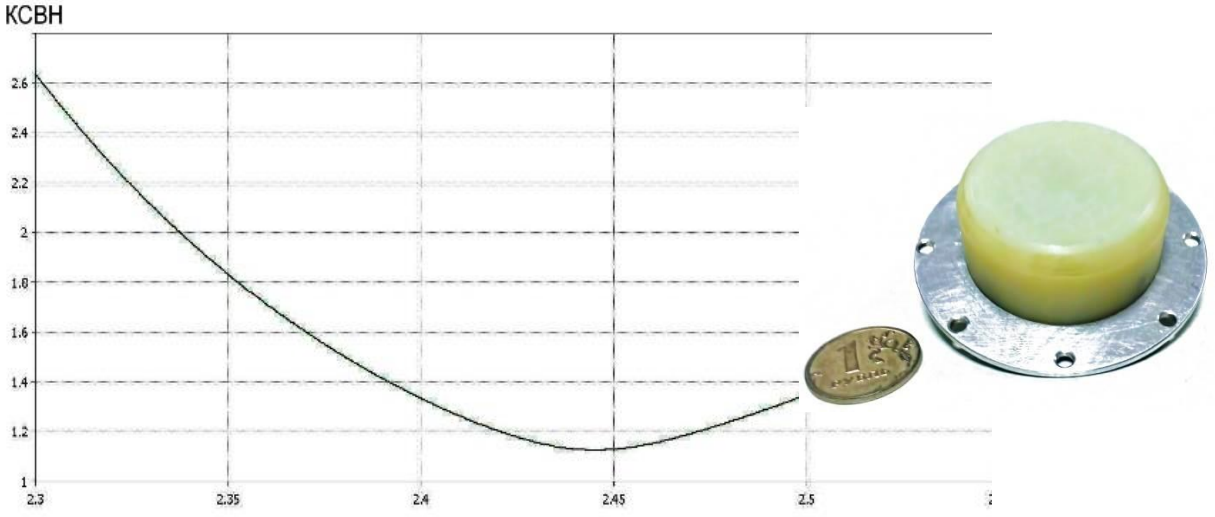


Рис. 8. Приемная антенна радиоканала.

Следует отметить, что ШПС и широкополосные системы связи получают распространение в специальных комплексах так как:

- обеспечивают высокую помехоустойчивость связи;
- допускают одновременную работу многих абонентов в общей полосе частот;
- позволяют создавать системы связи с повышенной скрытностью;
- обеспечивают электромагнитную совместимость (ЭМС) ШПСС с узкополосными системами радиосвязи и радиовещания, системами телевизионного вещания;
- обеспечивают лучшее использование спектра частот на ограниченной территории по сравнению с узкополосными системами связи.

Применение в представленных комплексах широкополосной цифровой радиолинии с пространственно разнесенным приемом позволило обеспечить электромагнитную совместимость при использовании в комплексе большого числа систем связи, а также обеспечить устойчивый прием цифрового телевизионного сигнала на расстоянии до 40 км при высоте полета вертолета – 250...300 м (при условии прямой видимости между вертолетом и наземным комплексом).

В заключение следует отметить, что к настоящему времени отсутствует информация о практически используемых, действующих образцах привязных БПЛА, получающих энергию с Земли для осуществления полета. Это объясняется тем, что на настоящий момент отсутствует практически

работающая система энергоснабжения, которая удовлетворяла бы ограничению на суммарную массу бортового источника энергии, и кабеля троса.

Суммарная масса должна составлять не более половины массы максимального полезного груза, поднимаемого БПЛА.

В настоящее время в ЗАО «МНИТИ» планируется проведение работ по созданию современного наземного комплекса с использованием в его составе привязного БПЛА с системой электропитания (СЭП) нового поколения, удовлетворяющей указанному ограничению. При проектировании был произведен анализ и выбор вариантов различных схем по передаче электроэнергии на основе критериев:

- минимальная масса;
- минимальные габариты;
- схемотехническая надежность;
- реализуемость на основе существующей электронной элементной базы;
- минимальная стоимость.

Проведенный анализ показал, что привязной БПЛА может работать от переменного тока частотой порядка (80-120) кГц.

Анализ также показал целесообразность использования резонансных схем преобразователей, как обеспечивающих максимально достижимое значение частоты, и максимальную схемотехническую надежность. Таким образом, задача синтеза СЭП (рисунок 9) была сведена к расчету и проектированию схем резонансного высокочастотного преобразователя, выпрямителя переменного тока и трансформаторов.

Рис. 9. Система электропитания.

Длина электромагнитной волны частотой 80 кГц равна 3750 м. Поэтому соединительную линию длиной 300 м уже надо считать электрически длинной и учитывать волновые процессы, происходящие в ней.

Наиболее важным из них является факт возникновения отраженной волны при отсутствии согласованной нагрузки линии. Это приводит к повышению (до удвоения) напряжения на некоторых участках линии, сравнительно с входным напряжением, потерям энергии и возможности пробоя изоляции проводов. Условием, при котором отраженная волна будет отсутствовать, является согласованность волнового сопротивления линии и сопротивления нагрузки, вытекающее из решения уравнения телеграфных линий Хэвисайда, описывающего распространение энергии в длинной линии. На рисунке 10 приведена функциональная схема СЭП для привязного БПЛА.

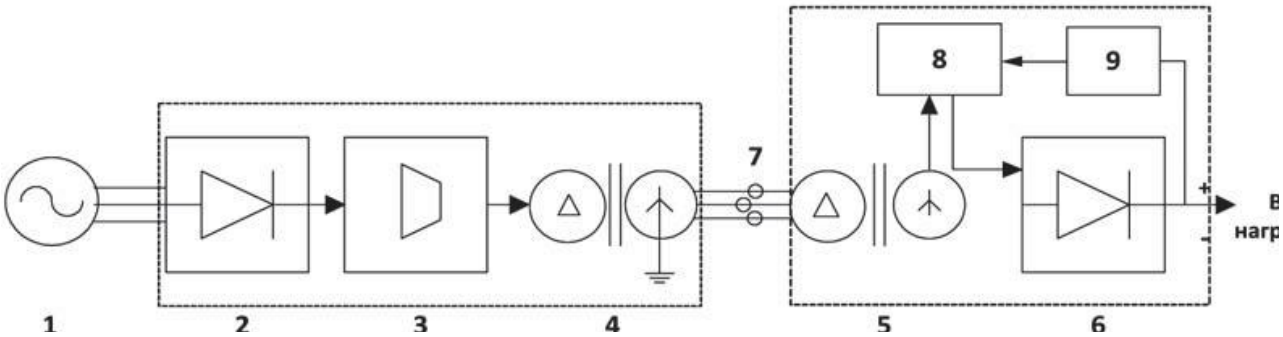


Рис. 10. Функциональная схема СЭП для привязного БПЛА.
1 – наземный источник электроэнергии; 2 – выпрямитель; 3 – преобразователь напряжения и частоты; 4 – повышающий высокочастотный трансформатор; 5 – понижающий трансформатор; 6 – выпрямитель; 7 – соединительная линия (3-фазный кабель); 8 – согласователь сопротивлений (гиратор); 9 – блок управления согласованием сопротивлений.

Наибольшую трудность при проектировании СЭП вызывает согласование входного сопротивления бортового преобразователя с сопротивлением линии, вследствие того, что привязной БПЛА является динамической системой, в которой уровень потребляемой мощности и сопротивление нагрузки изменяются во времени. Например, при запуске привязного БПЛА режим потребления мощности меняется от холостого хода до номинального. При этом сопротивление нагрузки изменяется от 500 до 0,4 Ом. На рисунке 11 приведена диаграмма изменения входного сопротивления выпрямителя при изменении сопротивления нагрузки в диапазоне от 0,1 до 256 Ом.

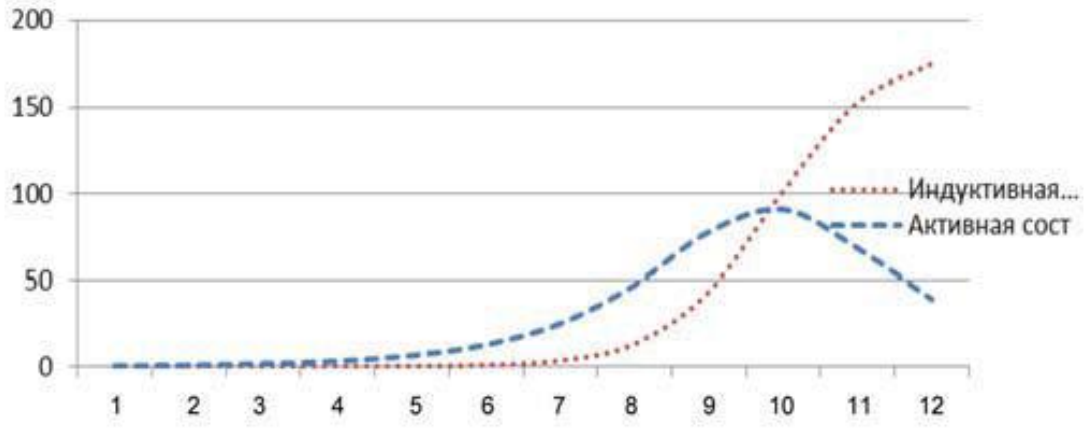


Рис. 11. Диаграмма изменения входного сопротивления выпрямителя.

Монотонный характер изменения входного сопротивления выпрямителя позволяет синтезировать простую схему согласования нагрузки и линии с помощью гиратора (LC цепи), включаемого между трансформатором и выпрямителем БП. Параметры гиратора вычисляются по формулам:

$$\begin{cases} \dfrac{1}{\omega C} = -\dfrac{X_2}{Q-1} \pm \sqrt{\dfrac{{X_2}^2}{(Q-1)^2} + \dfrac{{R_2}^2 + {X_2}^2}{Q-1}} \\ \omega L = X_1 + \dfrac{X_2}{Q} + \dfrac{1}{\omega C}\dfrac{Q-1}{Q} \end{cases}$$

где: $R1$ и $R2$ – активные составляющие согласуемых сопротивлений;
$X1$ и $X2$ – реактивные составляющие согласуемых сопротивлений;
$Q = R2/R1$.

Указанные решения позволяют построить высоконадежную СЭП с КПД ~ 0,98 (преобразователей) и низкими потерями в соединительной линии, при фазной мощности до 14 кВт (42 кВт по трем фазам).

Сфера применения привязных БПЛА может быть расширена за счет установки на его борту оборудования, решающего множество различных задач, например, охраны протяженных объектов или командно-информационного обеспечения работ в очагах чрезвычайных ситуаций в интересах МЧС, обеспечение многодиапазонного (видео, инфракрасного и РЛС) наблюдения, управления робототехническими средствами, обеспечения персонала локальной связью и т.д. В подобных ситуациях мобильные привязные БПЛА являются идеальным средством, позволяющим предельно оперативно организовывать указанные сервисы.

Литература

1. Афанасьев В.П., Гурвиц В.И. и др. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации. Под ред. В.Б. Пестрякова. – М., 1973. – 424 с.
2. Лёзин Ю.С. Введение в теорию радиотехнических систем. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
3. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
4. Вишневский В.М., Терещенко Б.Н. Система энергообеспечения с высокими уровнями КПД и надежности для удаленных потребителей, через соединительную линию малых сечений и масс / Proceedings of the International Workshop "Distributed Computer and Communication Networks (DCCN_2011)". Moscow, RF. M.: VINITI, 2011, pp. 158-163.

УДК 608.2

Федоров Ю. А.

Есипов Д. А.

РАЗРАБОТКА УНИФИЦИРОВАННОГО ВИДЕОМОДУЛЯ НА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ

Статья посвящена особенностям разработки устройств отображения для специальной аппаратуры на примере создания унифицированного видеомодуля. Рассматриваются специфические требования к разработке устройств отображения данного класса. Решаются задачи выбора электронной компонентной базы и разработки программного обеспечения для отдельных модулей в соответствии с заданным алгоритмом функционирования.

Введение

Существует широкая номенклатура радиоэлектронных систем и комплексов, в том числе и специального назначения, где в качестве средств отображения информации от разных датчиков используются видеомониторы и дисплеи. При этом параметры сигналов от этих датчиков обычно отличаются друг от друга, а их количество и варианты исполнения постоянно

увеличиваются. В этих условиях проблема достоверного отображения сигналов и сопутствующей информации (в том числе символьной и знакографической) на многофункциональном устройстве отображения является актуальной при построении перспективных бортовых систем.

Решением такой задачи может служить создание унифицированного видеомодуля (УВМ), способного обрабатывать поступающую информацию и отображать её на экране в форме, удобной для восприятия оператором. УВМ сможет обеспечить обработку сигналов, поступающих от различных источников, обмен информацией с центральным вычислителем, управление отдельными устройствами из состава аппаратуры основного изделия.

Создание подобного типа видеомодулей, унифицированных за счет применения современных методов обработки информации, позволит минимизировать количество используемых в составе комплексов аппаратуры индикаторов при сохранении объема отображаемой информации.

Но использование такого видеомодуля в составе специальной аппаратуры вносит свои особенности в требования при его разработке, которые значительно усложняют сохранение качественных и функциональных возможностей УВМ. Принципиальный подход заказчиков устройств такого класса – необходимость создания разрабатываемого устройства на основе отечественной элементной базы, обеспечение требуемого уровня радиационной стойкости и жесткое соблюдение алгоритма функционирования устройства по согласованному протоколу.

Назначение унифицированного видеомодуля УВМ

Область применения УВМ может быть достаточно широкой, так как он разрабатывался для работы в экстремальных условиях и способен выдерживать:

- Перепады температуры от 208 К (минус 65 °С) до 358 К (85 °С)
- Воздействие статической пыли (песок) при скорости циркуляции от 0,5 до 1,0 м/с и концентрации 3 г/м3.
- Воздействие динамической пыли (песок) при скорости циркуляции от 0,5 до 1,0 м/с и концентрации 3 г/м3.
- Воздействие акустических шумов в диапазоне частот от 50 до 10000 Гц с уровнем звукового давления 130 дБ

- Воздействие вибрации по осям X, Y, Z в диапазоне частот от 5 до 2000 Гц с перегрузками 5,5 g
- Воздействие одиночных ударов по осям XYZ с ускорением 15g и длительное ударное воздействие с ускорением 12g
- Воздействие спецфактора в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 20.39.305 (степень жесткости IIи, Iэ).

Внешний вид УВМ представлен на рисунке 1.

Рис. 1. Унифицированный видеомодуль УВМ.

Основные функции УВМ:

- преобразование стандарта изображения;
- специальная обработка сигналов изображения;
- совмещение телевизионной и знакографической информации;
- электронное масштабирование;
- распознавание малоразмерных низкоконтрастных объектов;
- обмен информацией с цифровой вычислительной машиной (ЦВМ) бортового вычислительного комплекса по протоколу заказчика;
- эксплуатация в жестких условиях;
- управление отдельными устройствами из состава аппаратуры основного изделия.

Технические характеристики видеомодуля приведены на рисунке 2.

Характеристика	Значение
Число адресуемых точек при приеме, обработке и преобразовании сигналов в формате 4:3 и 3:4	1024x768 пикселей
Электропитание	27 В по двухпроводной схеме, гальванически не связанной
Потребляемая мощность с системой термостабилизации	Не более 150 Вт
Время готовности к работе	Не более 30 секунд в нормальных климатических условиях; Не более 5 минут при пониженной температуре
Характеристика надежности и безотказности	
Время непрерывной работы	Не менее 24 часов
Средняя наработка до отказа	Не менее 6 000 часов
Средний ресурс до списания	Не менее 6 000 часов
Средний ресурс службы до списания	Не менее 12 лет
Срок сохраняемости в упаковке завода-изготовителя	Не менее 5 лет
Масса-габаритные характеристики	
Масса	8 кг
Высота	250 мм
Длина	280 мм
Глубина	280 мм

Рис. 2. Технические характеристики УВМ-4.

Подбор электронной компонентной базы

На начальной стадии разработки УВМ был проведен поиск и анализ информации по современной и перспективной электронной компонентной базе (ЭКБ) для создания устройства отображения в соответствии с техническим заданием, и прежде всего имеющейся в ограничительном перечне. При этом оценивались характеристики конкретного элемента, в том числе по стойкости к спецвоздействиям, и его способность работать в схеме видеомодуля, обеспечивая выполнение требований технического задания. Был изучен протокол взаимодействия разрабатываемого устройства с основным изделием предполагаемого потребителя, а также пункты технического задания, конкретизирующие особенности функционирования видеомодуля и определяющие выбор программируемых логических интегральных схем с параметрами, гарантирующими выполнение соответствующих требований технического задания.

Наибольшие трудности возникли в процессе поиска и выбора нужного варианта микросхемы аналого-цифрового преобразователя (АЦП), жидкокристаллического видеомонитора для модуля индикации и программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) с необходимыми параметрами.

В первом случае, в связи с отсутствием отечественных аналогов на момент разработки, выбор был остановлен на АЦП иностранного производства фирмы Analog Devices, в случае с видеомонитором – на разработке КБ «Дисплей», г. Витебск, а для ПЛИС были выбраны микросхемы серии 5576ХС Воронежского завода полупроводниковых приборов.

Видеомонитор КБ «Дисплей» был выбран в связи с тем, что это предприятие оказалось одним из немногих, удовлетворяющих требования заказчика. Кроме этого, разработчики видеомонитора согласились на доработку, обеспечивающую его применение в разработанном видеомодуле с сохранением приемки. В случае выбора ПЛИС альтернатива продукции Воронежского завода на момент начала разработки отсутствовала.

Еще одна зачастую неразрешимая в начале разработки проблема – необходимый по техническим характеристикам элемент далеко не всегда соответствует требованиям по спецстойкости, а сделать предварительный расчет всего устройства оказывается проблематично без привлечения специалистов. Недостаток достоверной информации о параметрах стойкости к спецвоздействиям привел к тому, что для выполнения идентичных функций в составе модуля обработки сигналов и модуля формирования символов были выбраны два разных ПЛИС, что, с одной стороны, позволило сэкономить средства на их закупку и уменьшить срок поставки, а, с другой стороны, привело к проблемам в выполнении требований ТЗ по спецстойкости на заключительном этапе разработки.

Особенности программного обеспечения

Также возник ряд затруднений в ходе написания программного обеспечения для ПЛИС. Для реализации алгоритма взаимодействия УВМ с внешними устройствами по мультиплексному каналу и выводу знакографической информации была выбрана ПЛИС 5576ХС1Т. Сложность разработки программного обеспечения заключалась в том, что в процессе написания программы памяти данной ПЛИС оказалось недостаточно. Поэтому все необходимые символы были внесены в память подряд с самого начала. Не было разделения на латинский и русский алфавит, что позволило объединить схожие знакографические символы. Таким образом удалось не только решить проблему нехватки памяти, но и часть её зарезервировать.

Для обработки видеосигнала была использована ПЛИС 5576ХС4Т. На данной ПЛИС, при помощи внешнего оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) 1645РУ4АУ, был реализован алгоритм для конвертирования видеосигнала вещательного стандарта (чересстрочная развертка) в видеосигнал повышенного стандарта (построчная развертка). Также был реализован алгоритм масштабирования изображения (увеличение изображения в 2 и 4 раза). Однако у данного ОЗУ максимальная скорость записи информации производится на частоте 32 МГц, что ограничивает качество изображения при масштабировании. Для реализации работы УВМ в обоих стандартах было разработано устройство распознавания стандарта, автоматически приводящее к единому виду изображения на мониторе. Здесь же реализована функция контраста изображения, на основе принципа линейного контрастирования. Так же был реализован алгоритм оконтуривания изображения посредством матрицы 3х3.

Аналого-цифровой преобразователь

В процессе выполнения данной работы постоянно мониторилась информация по разрабатываемой отечественной промышленностью ЭКБ, прежде всего для замены АЦП иностранного производства и организации поиска аналогичной примененной в начале разработки отечественной ЭКБ, имеющей необходимые характеристики по спецстойкости. В результате были выяснены специфические особенности отечественного аналога микросхемы АЦП, связанные с необходимостью обеспечения требуемого уровня, полярности и амплитуды входных сигналов и преобразования уровня выходных сигналов в связи с разницей в номиналах питающих напряжений, а также отсутствием функций термокомпенсации и калибровки выходных сигналов. В связи с этим к моменту получения первых образцов микросхемы АЦП отечественного производства нами была разработана специальная печатная плата, на которой был протестирован аналог АЦП.

Кроме того, были подобраны и схемотехнически отработаны варианты для замены ЭКБ с недостаточной стойкостью к спецвоздействиям, в том числе с учетом оптимизации и унификации применяемых комплектующих. Таблица замены электронных компонентов в УВМ приведена на рисунке 3.

8-канальный аналоговый коммутатор с дешифратором		
ИС590КН3 ИС590КН6	⟷	1127КН3 1127КН6
ПЛИС		
5576ХС1Т	⟷	5576ХС6Т
ПЗУ		
5576РС1У	⟷	5576РТ1У
ОЗУ		
1645РУ3АУ	⟷	1645РУ4АУ
Индикаторы		
3Л341Б 3Л341Г	⟷	ИПД148А-К ИРД148А-Л
АЦП		
AD9051BRS	⟷	5101НВ015

Рис. 3. Таблица замены электронных компонентов в УВМ-4.

Заключение

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности комплектования УВМ полностью отечественной ЭКБ, обеспечив при этом выполнение требований технического задания. На основе такого унифицированного модуля возможно создание отечественных много-функциональных систем отображения информации нового поколения с расширенными возможностями, включая способность к автоматическому распознаванию формата изображения, улучшенным качеством воспроизводимой информации, обеспечением условий для распознавания малоразмерных низкоконтрастных изображений. Однако всё-таки существует необходимость повышать уровень отечественной радиоэлектронной компонентной базы и ориентировать её на возможность использования в жестких условиях. Это значительно повысит эргономические и технические возможности перспективных отечественных разработок специальной аппаратуры.

Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
2. Динамика радиоэлектроники / Под общ. ред. Борисова Ю. И. – М.: Техносфера, 2007. – 400 с.

УДК 004.72

Шулешкин А. П.

АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СПУТНИКОВЫХ КАНАЛОВ СЕАНСОЙ СВЯЗИ С ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Приведен анализ помехоустойчивости широкополосных сигналов, для различных методов модуляции, избыточности и алгоритмов канального кодирования в спутниковых сетях сеансной связи различного назначения. Рассмотрена специфика построения сетей сеансной связи и особенности построения систем синхронизации широкополосных сигналов. Показаны преимущества использования в таких сетях алгоритмов формирования и обработки широкополосных сигналов с прямым расширением спектра узкополосных сигналов с модуляцией ФМ-4

Отличительной особенностью систем связи с летательными аппаратами (ЛА), являются существенные допплеровские сдвиги частоты и ограничения по мощностным и массогабаритным показателям.

Другой особенностью организации систем широкополосной связи, является то, что при высоких значениях базы сигнала (больше нескольких десятков) длительность сеанса связи может быть соизмерима с длительностью установления синхронизации в радиолинии.

В данной статье рассматриваются два основных класса широкополосных систем связи (с учетом массогабаритных ограничений и особенностей построения систем связи с ЛА):

- с прямым расширением спектра узкополосных сигналов с М-ичной квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ);

– с М-ичными ортогональными широкополосными сигналами.

Для рассмотренных классов сигналов проводится анализ помехоустойчивости и оптимизация выбора системы модуляции и помехоустойчивого кодирования.

Широкополосными называют системы связи, для которых произведение длительности элемента сообщения (двоичного символа или кодового слова, состоящего из нескольких двоичных символов) T_c, на эффективную ширину спектра сигнала ΔF_c, используемого для передачи, существенно больше единицы. Величину

$$B = T_c \times \Delta F_c \tag{1}$$

называют базой сигнала [1].

Двусторонний спектр узкополосного сигнала ΔF_{yc} связан с символьной скоростью передачи информации R_c соотношением:

$$\Delta F_{\text{ус}} \approx 2 \times R_c = 2/T_c\ . \tag{2}$$

Если в широкополосной системе связи для передачи используется ансамбль сигналов размерности M и на вход системы поступают двоичные данные со скоростью передачи R_b, соотношение (1) принимает вид:

$$B = \frac{\Delta F_c}{\Delta F_{\text{ус}}} = \frac{\Delta F_c \times \log_2 M}{2 \times R_b} \tag{3}$$

Далее принимается, что для формирования широкополосных сигналов (ШПС) используются псевдослучайные последовательности (ПСП) с длительностью $N_{\text{ПСП}}$, равной базе сигнала в системе связи с соответствующим набором символов M

$$N_{\text{ПСП}} = \log_2 M \times \frac{\Delta F_c}{2 \times \text{R}_{\text{б}}} \tag{4}$$

Общая структурная схема спутниковой линии с широкополосными сигналами, сформированными методом прямого расширения спектра узкополосных сигналов, приведена на рисунке 1.

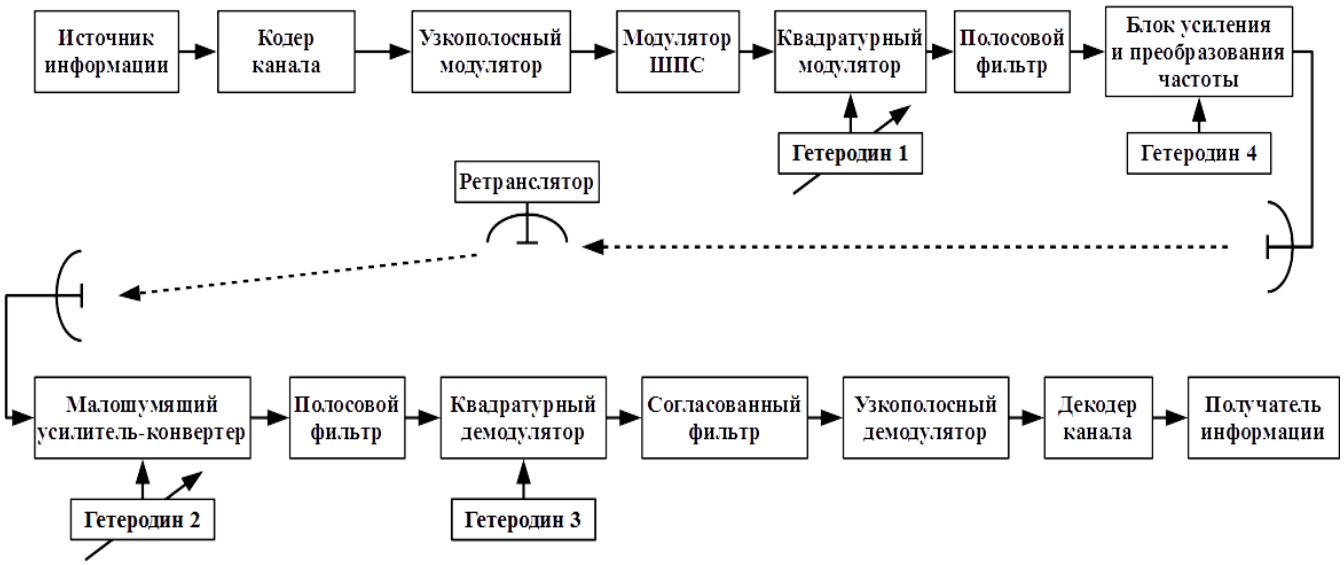


Рис. 1. Структурная схема спутниковой линии с широкополосными сигналами.

При предположении, что в радиолинии уже установлена синхронизация, и без учета шумов взаимной неортогональности, системы с ортогональными М-ичными широкополосными сигналами обладают более высокой помехоустойчивостью, чем системы с прямым расширением спектра. Однако такие системы требуют существенно больших аппаратных и вычислительных затрат, чем системы с прямым расширением спектра.

С другой стороны, помехоустойчивость системы, использующей четыре широкополосных сигнала (без учета шумов взаимной неортогональности) совпадает с помехоустойчивостью системы с прямым расширением спектра узкополосных сигналов с КАМ-4.

Для систем с прямым расширением спектра примем, что на выходе согласованного фильтра отношение сигнал/шум увеличивается в B раз:

$$(E_s/N_0)_{\text{вых}}(\text{дБ}) = (E_s/N_0)_{\text{вх}}(\text{дБ}) + 10 \times \lg(B) \qquad (5)$$

где: E_s – энергия, приходящаяся на символ, N_0 – спектральная плотность мощности шума.

Выражение (5) соответствует предположению об отсутствии энергетических шумов неортогональности.

Далее приводится определение целесообразности использования узкополосных сигналов с М-ичной модуляцией в системах с прямым расширением спектра.

Эквивалентная вероятность ошибки, отнесенная к одной двоичной единице кодированных данных на выходе демодулятора КАМ, определяется из соотношения [2]:

$$P_b = \frac{2\times\left(1-\frac{1}{\sqrt{M}}\right)}{\log_2(\sqrt{M})} \times Q\left(\sqrt{\left(\frac{3\times\log_2(\sqrt{M})}{M-1}\right)\times\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (6)$$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{E_s}{N_0} + 10\times\lg(B) \quad (7)$$

где E_b – энергия, приходящаяся на бит передаваемых данных.

Результаты расчета вероятности ошибки в зависимости от E_b/N_0 на выходе устройства свертки ШПС (входе демодулятора КАМ) приведены на рисунке 2.

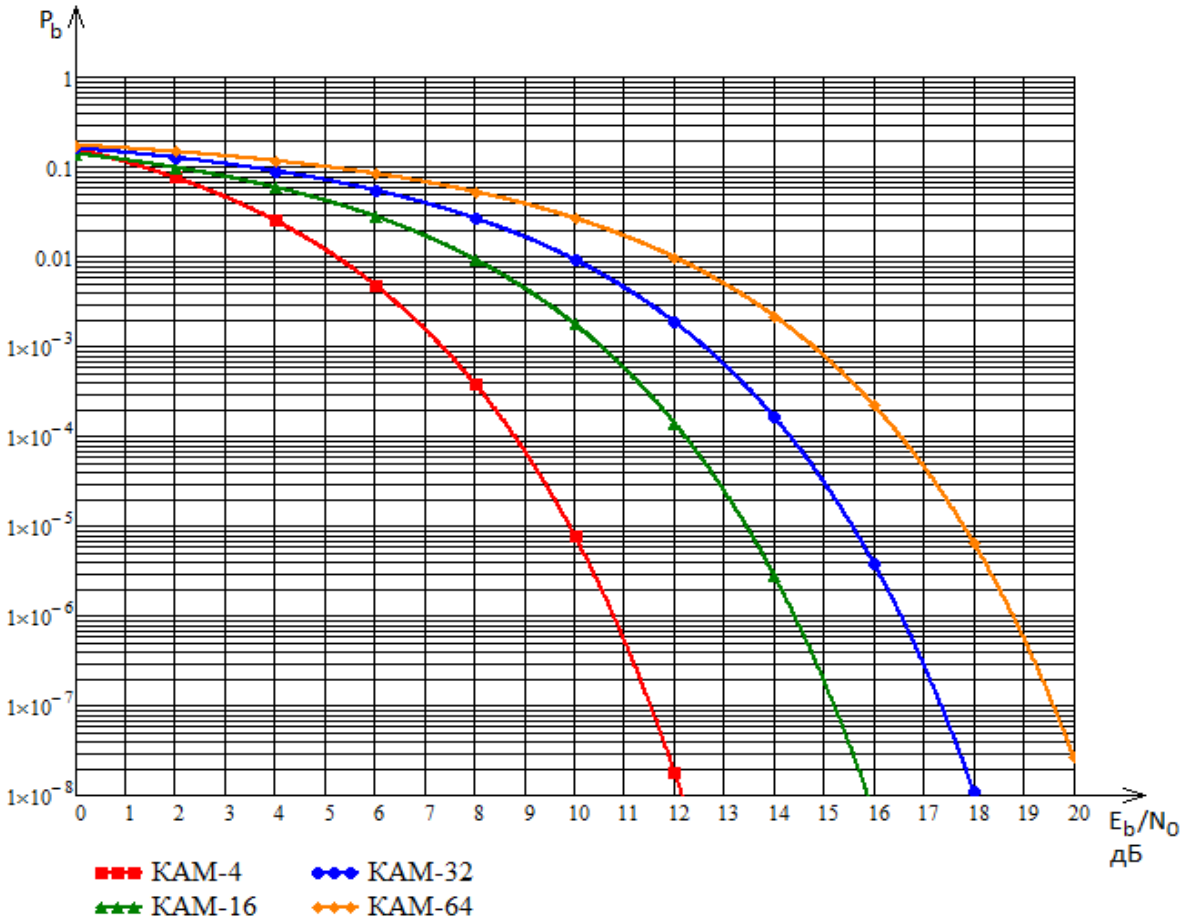


Рис. 2. Вероятность ошибки в зависимости от E_b/N_0 на выходе согласованного фильтра.

В современных системах связи используются системы кодирования и декодирования, обеспечивающие выходную битовую вероятность ошибки $10^{-9}\ldots10^{-6}$, при входной вероятности ошибки $10^{-1}\ldots10^{-3}$.

В таблице 1 приведены минимально необходимые значения E_b/N_0 для обеспечения вероятности ошибки на входе декодера $10^{-1}\ldots10^{-3}$.

Таблица 1. Минимально необходимые значения E_b/N_0 для обеспечения вероятности ошибки на входе декодера.

Вероятность битовой ошибки	**E_b/N_0, дБ**			
	КАМ-4	КАМ-16	КАМ-32	КАМ-64
10^{-3}	7,335	10.522	12.59	14.767
10^{-2}	5.208	7.882	9.863	11.954
10^{-1}	1.312	1.882	3.397	4.982

Из таблицы 1 и рисунка 1 видно, что для всех уровней вероятности ошибки на входе декодера, минимальное значение E_b/N_0 достигается при КАМ-4.

Следовательно, использование в широкополосных системах с прямым расширением спектра набора из более четырех символов нецелесообразно. В результате для систем с прямым расширением спектра оказываются пригодными только КАМ-4 и ФМ-2.

Далее приводится сравнительный анализ системы с прямым расширением спектра при модуляции ФМ-4 с системами передачи квазиортогональных широкополосных сигналов с М-ичной модуляцией.

Вероятность символьной ошибки $P_E(M)$ для равновероятных ортогональных сигналов с когерентным декодированием можно выразить как [2]:

$$P_E(M) \leq (M-1) \times Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}}\right), \tag{8}$$

где: M – размерность ансамбля сигналов, используемых для передачи данных; E_s – энергия, приходящаяся на символ широкополосного сигнала длительностью $N_{ПСП}$; N_0 – эквивалентная спектральная плотность мощности шума на входе устройства свертки ШПС;

$$Q(x) = \frac{1}{2\pi}\int_x^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}}du \text{ – интеграл вероятности.} \tag{9}$$

Вероятность битовой ошибки P_b для М-ичных ортогональных сигналов составляет:

$$P_b = P_E\frac{M/2}{M-1}\ . \tag{10}$$

Анализу шумов неортогональности в зависимости от метода модуляции и ансамблей выбранных псевдослучайных последовательностей посвящены работы [4].

Далее принимается, что апериодическая взаимно корреляционная функция квазиортогональных псевдослучайных последовательностей составляет $3 \times \sqrt{B} = 3 \times \sqrt{N_{\text{псп}}}$, что соответствует последовательностям Голда.

Учет шумов взаимной неортогональности производится с использованием следующего выражения:

$$(E_s/N_0)_{\text{вых}}(\text{дБ}) = (E_s/N_0)_{\text{вх}}(\text{дБ}) + 10 \times \lg\left(B - 3\sqrt{B}\right). \qquad (11)$$

Для проведения сравнительного анализа рассматриваемых систем модуляции используются следующие правила:

- для всех систем модуляции выбирается фиксированная ширина спектра ΔF_c;
- для всех систем модуляции выбирается фиксированная входная битовая скорость передачи R_b;
- для всех систем модуляции выбрана заданная вероятность ошибки на выходе системы помехоустойчивого декодирования не более 10^{-6};
- для каждой системы модуляции используется оптимизированная система помехоустойчивого декодирования из следующих классов:
  - A_1 – сверточное кодирование и декодирование по Витерби в соответствии со стандартом DVB-T;
  - A_2 – каскадное кодирование и декодирование по Витерби и Риду-Соломону в соответствии со стандартом DVB-T;
  - A_3 – турбокодирование в соответствии со стандартом DVB-S2.

В качестве критерия оптимальности системы $g(M, r, A_i)$ выбрано отношение мощности сигнала $P_{\text{с}}$ к суммарной мощности помех и шума $P_{\text{п}}$ на входе демодулятора:

$$g(M, r, A_i) = (P_{\text{с}}/P_{\text{п}})_{\text{вх}} = (E_s/N_0)_{\text{вх}}, \qquad (12)$$

где r – избыточность для схемы помехоустойчивого кодирования A_i. Наилучшей является система, обеспечивающая минимальное значение этого критерия при заданных скорости и вероятности ошибки передачи.

В системе могут варьироваться длина ПСП, база сигнала, размерность сигналов M, используемых для передачи данных, избыточность и алгоритмы канального кодирования.

Очевидно, что в приведенной постановке в системах М-ичной передачи должна использоваться база сигнала, зависящая от M:

$$N_{\text{ПСП}} = \log_2 M \times \frac{\Delta F_c}{2R_б} \tag{13}$$

Сравнительный анализ проведем для двух вариантов $N_{\text{ПСП}}$. Для базы $N_{\text{ПСП}} = 63$ при $M = 4$, как минимально допустимой в соответствии с соотношением (11). При меньших значениях $N_{\text{псп}}$ шумы взаимной неортогональности превысят 2 дБ из-за высокой взаимной корреляции сигналов. И для максимально реализуемой на существующей элементной базе $N_{\text{ПСП}} = 511$ при $M = 4$ (в соответствии с соотношением (13), при $M = 512$ база составляет 2299).

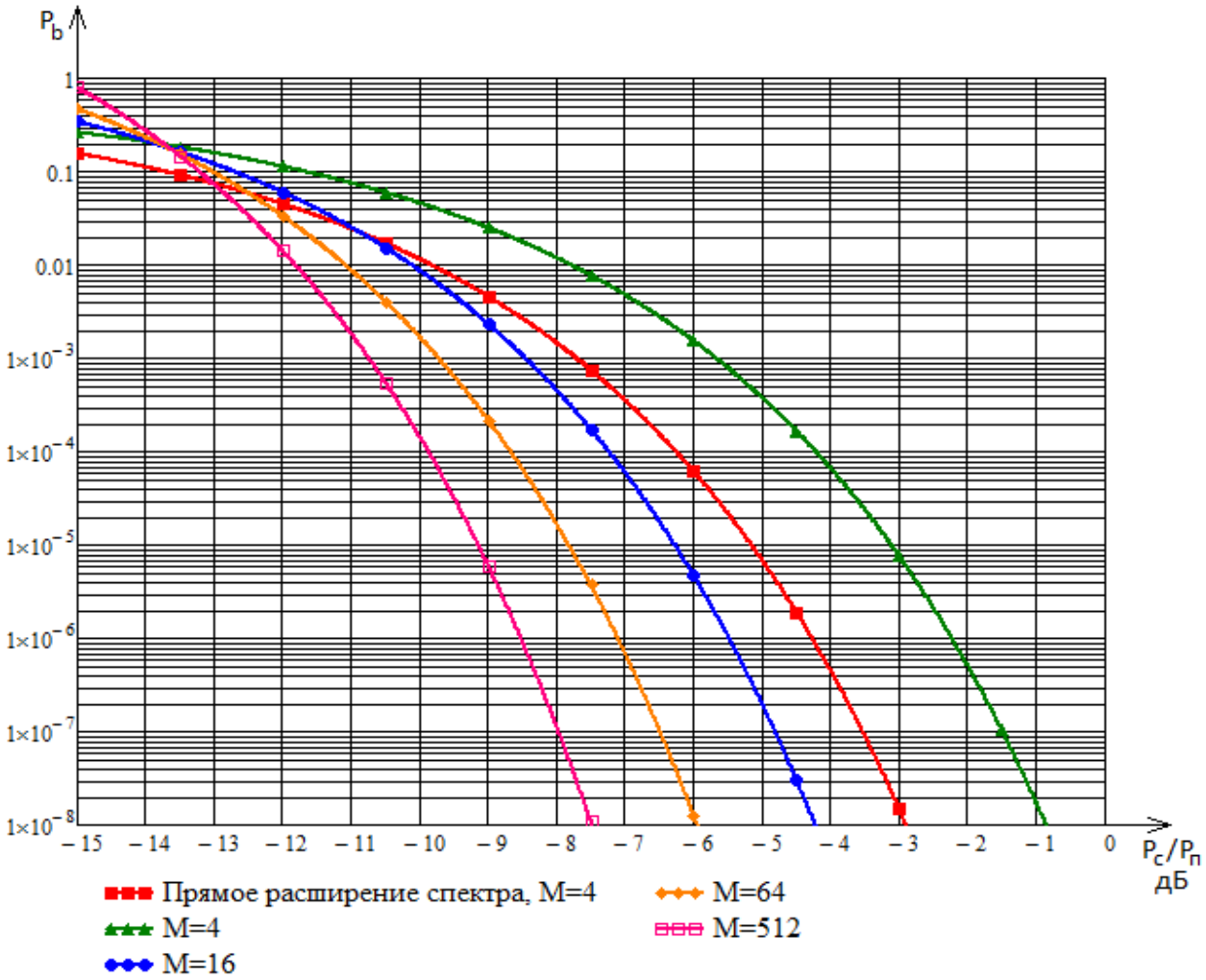


Рис. 3. P_b на выходе демодулятора ШПС в зависимости от P_c/P_n на входе демодулятора для $N_{\text{псп}} = 63$ при $M = 4$.

Результаты расчета вероятности ошибок на выходе демодулятора ШПС, в зависимости от отношения мощности сигнала к суммарной мощности помехи и шума на входе устройства свертки ШПС для $N_{ПСП} = 63$ при $M = 4$ приведены на рисунке 3 и в таблице 2, а для $N_{ПСП} = 511$ при $M = 4$ на рисунке 4 и в таблице 3.

Таблица 2. Зависимость P_b на выходе демодулятора ШПС от $P_c/P_п$ на входе демодулятора для $N_{ПСП} = 63$ при $M = 4$.

Вероятность битовой ошибки	**$P_c/P_п$, дБ**				
	ФМ-4	М = 4	М = 16	М = 64	М = 512
10^{-6}	–4,27	–2,23	–5,48	–7,11	–8,52
10^{-3}	–7,72	–5,68	–8,46	–9,73	–10,74
10^{-2}	–9,84	–7,8	–10,12	–11,09	–11,82
5×10^{-2}	–12,22	–10,18	–11,78	–12,36	–12,75
10^{-1}	–13,74	–11,7	–12,72	–13,04	–13,22

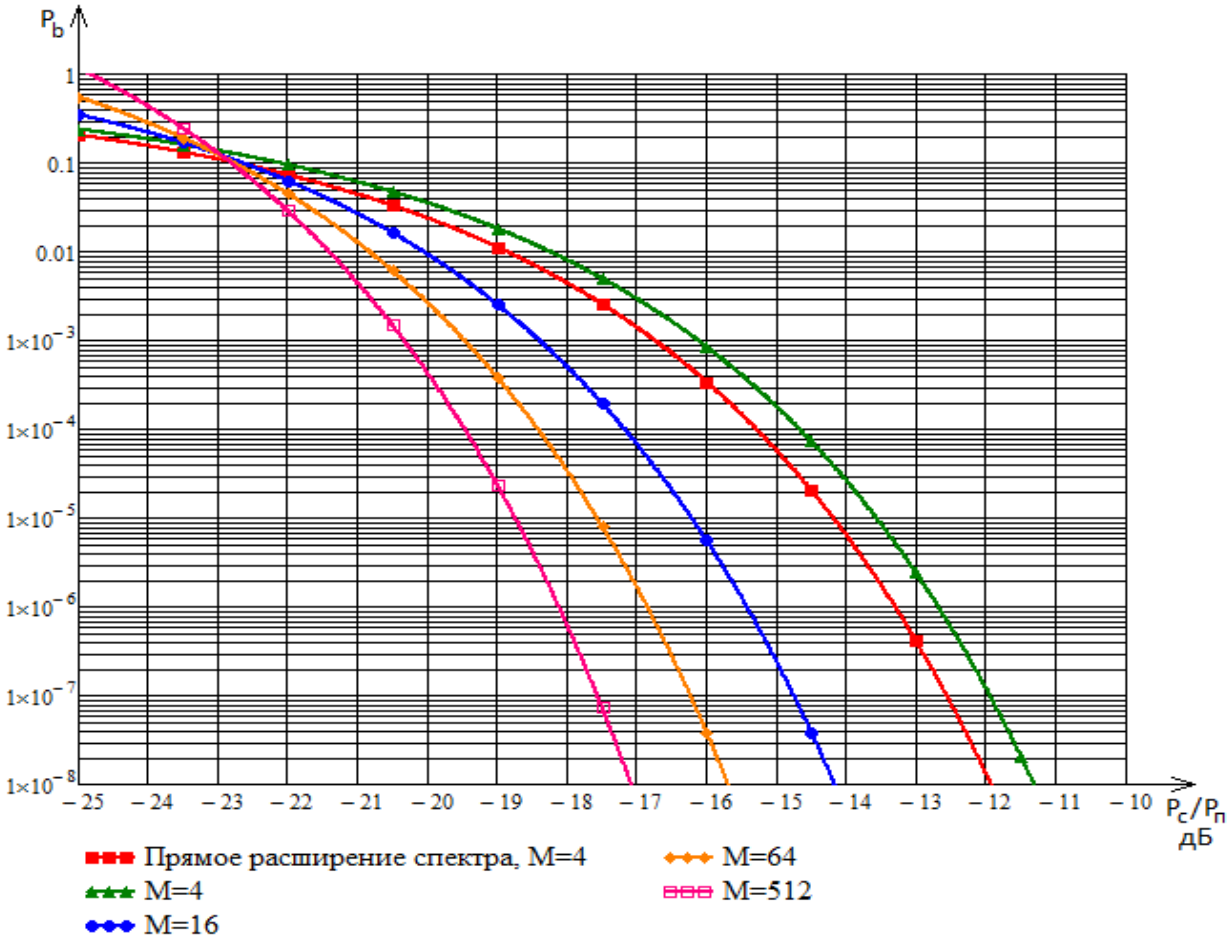


Рис. 4. P_b на выходе демодулятора ШПС в зависимости от $P_c/P_п$ на входе демодулятора для $N_{ПСП} = 511$ при $M = 4$.

Таблица 3. Зависимость P_b на выходе демодулятора ШПС от $P_c/P_п$ на входе демодулятора для $N_{ПСП} = 511$ при $M = 4$.

Вероятность P_b	**$P_c/P_п$, дБ**				
	ФМ-4	М = 4	М = 16	М = 64	М = 512
10^{-6}	–13,3	–12,69	–15,43	–16,85	–18,12
10^{-3}	–16,75	–16,13	–18,4	–19,47	–20,34
10^{-2}	–18,87	–18,26	–20,07	–20,84	–21,41
5×10^{-2}	–21,25	–20,63	–21,72	–22,11	–22,35
10^{-1}	–22,77	–22,15	–22,67	–22,78	–22,82

Из приведенных данных можно сделать следующие выводы:

- при $P_b = 10^{-6}$ без использования системы помехоустойчивого кодирования система передачи с $M = 512$ превосходит систему с прямым расширением спектра на 4,5…5 дБ;
- в случае использования гипотетической системы помехоустойчивого кодирования, обеспечивающей работу при входной вероятности битовой ошибки $P_b = 0{,}1$ все рассматриваемые системы передачи становятся практически эквивалентными друг другу;
- при требуемой входной вероятности ошибки $P_b = 0{,}01$, наилучшей была бы система с использованием 512 ортогональных псевдослучайных последовательностей, имеющая энергетический выигрыш у системы с прямым расширением спектра равный приблизительно 2… 2,5 дБ;
- при требуемой входной вероятности ошибки $P_b = 0{,}01$ система с прямым расширением спектра ФМ-4 и система с 16 ортогональными псевдослучайными последовательностями при $N_{ПСП} = 63$ эквивалентны друг другу, а при $N_{ПСП} = 511$, разница между ними составляет всего 1 дБ;
- при требуемой входной вероятности ошибки $P_b = 0{,}01$ система с прямым расширением спектра при $N_{ПСП} = 63$ выигрывает 2 дБ у системы с 4 ортогональными псевдослучайными последовательностями, а при $N_{ПСП} = 511$ выигрывает 0,6 дБ;
- система с прямым расширением спектра ФМ-4 при всех отношениях сигнал/шум предпочтительнее системы с 4 ортогональными псевдослучайными последовательностями.

Таким образом, эффективность рассматриваемых методов передачи в существенной мере определяются системой канального кодирования и максимально допустимой вероятностью ошибки на её входе.

В данной работе рассмотрены известные системы кодирования, применяемые в сетях связи и вещания стандартов DVB-S, DVB-S2, DVB-T. Сводные данные по этим системам приведены в таблице 4, где: $P_{b.\text{вх}}$ – эквивалентная битовая вероятность ошибки на входе декодера; $P_{b.\text{вых}}$ – битовая вероятность ошибки на выходе декодера.

Таблица 4. Помехоустойчивость систем помехоустойчивого кодирования стандартов DVB-S, DVB-S2, DVB-T.

$P_{\text{b.вх}}$		**7×10^{-2}**	**3×10^{-2}**	**2×10^{-2}**	**1×10^{-2}**	**3×10^{-3}**	**1×10^{-3}**	**2×10^{-4}**
Кодер	Избыточность кодирования r	$P_{\text{b.вых}}$						
A_1 Витерби	2	7×10^{-2}	3×10^{-2}	2×10^{-3}	6×10^{-5}	1×10^{-6}	2×10^{-8}	4×10^{-10}
	1,33	7×10^{-2}	3×10^{-2}	2×10^{-2}	5×10^{-3}	1×10^{-4}	3×10^{-6}	1×10^{-7}
	1,143	7×10^{-2}	3×10^{-2}	2×10^{-2}	1×10^{-2}	3×10^{-3}	1×10^{-4}	8×10^{-6}
A_2 Витерби+ Рида-Соломона	2,2	7×10^{-2}	3×10^{-2}	2×10^{-6}	1×10^{-10}	5×10^{-15}	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$
	1,463	7×10^{-2}	3×10^{-2}	2×10^{-2}	5×10^{-3}	8×10^{-9}	8×10^{-14}	$<10^{-15}$
	1,257	7×10^{-2}	3×10^{-2}	2×10^{-2}	1×10^{-2}	3×10^{-3}	6×10^{-7}	5×10^{-13}
A_3 турбо-кодирование	1,2	7×10^{-2}	3×10^{-2}	1×10^{-3}	1×10^{-11}	5×10^{-14}	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$
	1,33	7×10^{-2}	1×10^{-3}	1×10^{-8}	1×10^{-13}	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$
	2,1	1×10^{-2}	4×10^{-7}	2×10^{-11}	7×10^{-14}	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$
	3,2	4×10^{-6}	5×10^{-10}	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$

С учетом данных таблицы 2 в таблице 5 приведены результаты сравнительного анализа эффективности рассматриваемых методов передачи широкополосных сигналов для $N_{\text{ПСП}}$ = 63, заданной вероятности ошибки на

выходе системы помехоустойчивого декодирования $P_{ош.вых} < 10^{-6}$, ΔF = 30 МГц, и R_b = 476,2 кбит/с.

Для приведения оценок помехоустойчивости к одной и той же скорости передачи для различных значений избыточности кодирования r, минимально допустимые отношения мощности сигнала к суммарной мощности помехи и шума на входе устройства свертки ШПС приведенные в таблицах 2 и 3 увеличиваются на величину $10\times\log_2 r$.

В таблице также приведены оценки помехоустойчивости для варианта, при котором помехоустойчивое кодирование не используется.

Таблица 5 Минимально допустимые отношения $P_c/P_п$ для различных методов модуляции и помехоустойчивого кодирования для $N_{ПСП}$ = 63.

Кодер	$P_{b.вых}$	10^{-6}					$P_{b.вх}$
	Избыточность кодирования r	$P_c/P_п$, дБ					
		ФМ-4	М = 4	М = 16	М = 64	М = 512	
A_1 Витерби	2	–5,6	–3,56	–6,17	–7,32	–8,21	3×10^{-3}
	1,33	–5,99	–3,95	–6,82	–8,14	–9,22	5×10^{-4}
	1,143	–5,68	–3,64	–6,66	–8,09	–9,29	10^{-4}
A_2 Витерби + Рида-Соломона	2,2	–7,3	–5,26	–7,34	–8,17	–8,77	2×10^{-2}
	1,463	–7,44	–5,4	–7,9	–8,98	–9,81	5×10^{-3}
	1,257	–7,03	–4,99	–7,72	–8,94	–9,92	$1,5\times10^{-3}$
A_3 Турбокодирование	1,2	–9,05	–7,01	–9,33	–10,3	–11,03	10^{-2}
	1,33	–9,49	–7,45	–9,53	–10,36	–10,96	2×10^{-2}
	2,1	–8,11	–6,07	–7,97	–8,7	–9,21	3×10^{-2}
	3,2	–7,85	–5,81	–7,17	–7,63	–7,92	7×10^{-2}
Не используется	1	–4,2	–2,3	–5,5	–7,1	–8,5	

В таблице 6 приведены оценки помехоустойчивости для $N_{ПСП}$ = 511 и скорости передачи R_b = 58,7 кбит/с (при тех же исходных данных).

Таблицы 5 и 6 для выбранных сигнальных созвездий и классов помехоустойчивых кодов, а также выбранной достоверности передачи на выходе канала связи, позволяют проводить совместную оптимизацию методов модуляции и кодирования.

Наилучшей из рассмотренных по выбранному критерию (12) будет система, для которой [M; r; A_i] = [512; 1,2; A3].

Таблица 6. Минимально допустимые отношения $P_с/P_п$ для различных методов модуляции и помехоустойчивого кодирования для $N_{ПСП} = 511$.

Кодер	$P_{b.вых}$	10^{-6}					$P_{b.вх}$
	Избыточность кодирования r	$P_с/P_п$, дБ					
		ФМ-4	М = 4	М = 16	М = 64	М = 512	
A_1 Витерби	2	–14,63	–14,01	–16,1	–17,05	–17,8	3×10^{-3}
	1,33	–15,01	–14,39	–16,75	–17,88	–18,81	5×10^{-4}
	1,143	–14,7	–14,09	–16,59	–17,83	–18,88	10^{-4}
A_2 Витерби+ Рида-Соломона	2,2	–16,33	–15,71	–17,28	–17,91	–18,36	2×10^{-2}
	1,463	–16,47	–15,85	–17,84	–18,72	–19,4	5×10^{-3}
	1,257	–16,06	–15,44	–17,65	–18,68	–19,51	$1,5\times10^{-3}$
A_3 Турбокодирование	1,2	–18,07	–17,46	–19,26	–20,04	–20,61	10^{-2}
	1,33	–18,51	–17,89	–19,46	–20,09	–20,55	2×10^{-2}
	2,1	–17,13	–16,51	–17,9	–18,43	–18,8	3×10^{-2}
	3,2	–16,87	–16,25	–17,1	–17,36	–17,51	7×10^{-2}
Не используется	1	–13,4	–12,7	–15,5	–16,8	–18,1	

Из приведенных данных могут быть сделаны следующие выводы.

– С увеличением M падает выигрыш оптимальной системы кодирования по сравнению с системой без кодирования. Например, при M = 4 выигрыш системы с оптимальным кодированием составляет 5,1 дБ, а при M = 512 выигрыш системы с оптимальным кодированием составляет всего 2,5 дБ.

– При рассмотренных базах сигнала выигрыш от использования системы кодирования практически не зависит от величины базы сигнала.

– При фиксированной полосе сигнала и фиксированной скорости передачи показатель помехоустойчивости $P_с/P_п$ для всех M немонотонным образом

зависит от избыточности кодирования r. Для каждого из рассмотренных M существует свой оптимальный выбор избыточности кодирования r глобально оптимального выбора системы модуляции и кодирования.

– Для принятой постановки задачи наилучшей является система с $M = 512$ и кодированием ТК 5/6 при всех рассмотренных базах сигналов (длинах ПСП).

– При малой длине ПСП (63, 127) система с прямым расширением спектра обладает большей помехоустойчивостью, чем система с ортогональными сигналами с $M = 16$.

Приведенные результаты соответствуют гипотетическому случаю, для которого в линии связи частотная и временная синхронизация считается установленной.

Для установления синхронизации в линии может использоваться:

- синхронизация по сигналу, модулированному полезными данными, за счет потери части этих данных в начале сеанса связи;
- синхронизация по немодулированной преамбуле, передаваемой в начале сеанса;
- синхронизация по преамбуле, передаваемой одновременно с данными.

Максимально допустимое рассогласование частоты приемного гетеродина и частоты принимаемого сигнала зависит от длительности ШПС $T_{ШПС}$ и метода модуляции информационных сигналов.

За время $T_{ШПС}$ фаза радиосигнала не должна измениться более чем на $\pm\alpha\times\Delta\varphi$, где: $\Delta\varphi$ – расстояние между соседними точками сигнального созвездия, α – коэффициент, определяющий максимально допустимый уровень энергетических потерь за счет фазового рассогласования и обычно принимаемый равным 0,1…0,25.

Частотное рассогласование обусловлено нестабильностью частот гетеродинов передатчика, спутника-ретранслятора, приемника.

Для мобильных объектов, для фиксированных объектов, работающих через космические аппараты (КА) на высокоэллиптической орбите, как и для низкоорбитальных КА частотное рассогласование возникает также за счет эффекта Доплера.

При работе по спутниковым радиоканалам через современные КА на геостационарной орбите максимальное частотное рассогласование $\Delta f_р$ может

составлять десятки килогерц, даже при использовании радиочастотного оборудования с высокостабильными гетеродинами.

Для систем сеансной связи, в которых допустима потеря части передаваемых данных в начале сеанса, синхронизация может осуществляться по сигналу, модулированному полезными данными. Такой вариант упрощает построение как передающего, так и приемного тракта системы.

Рассмотрим особенности построения системы частотной синхронизации для этого варианта.

Зависимость амплитуды отклика на выходе согласованного фильтра от частотного рассогласования представляется в виде:

$$R(\Delta\omega) = \frac{1}{T_{\text{ШПС}}}\int_0^{T_{\text{ШПС}}} e^{i\times\Delta\omega\times t}dt = \left|\frac{\sin\frac{\Delta\omega\times T_{\text{ШПС}}}{2}}{\frac{\Delta\omega\times T_{\text{ШПС}}}{2}}\right| \qquad (14)$$

где Δω – разность частот гетеродинов приемника и передатчика.

Зависимость амплитуды отклика на выходе согласованного фильтра от нормированного параметра частотного рассогласования $\Delta\omega\times T_{\text{ШПС}}$ приведена на рисунке 5.

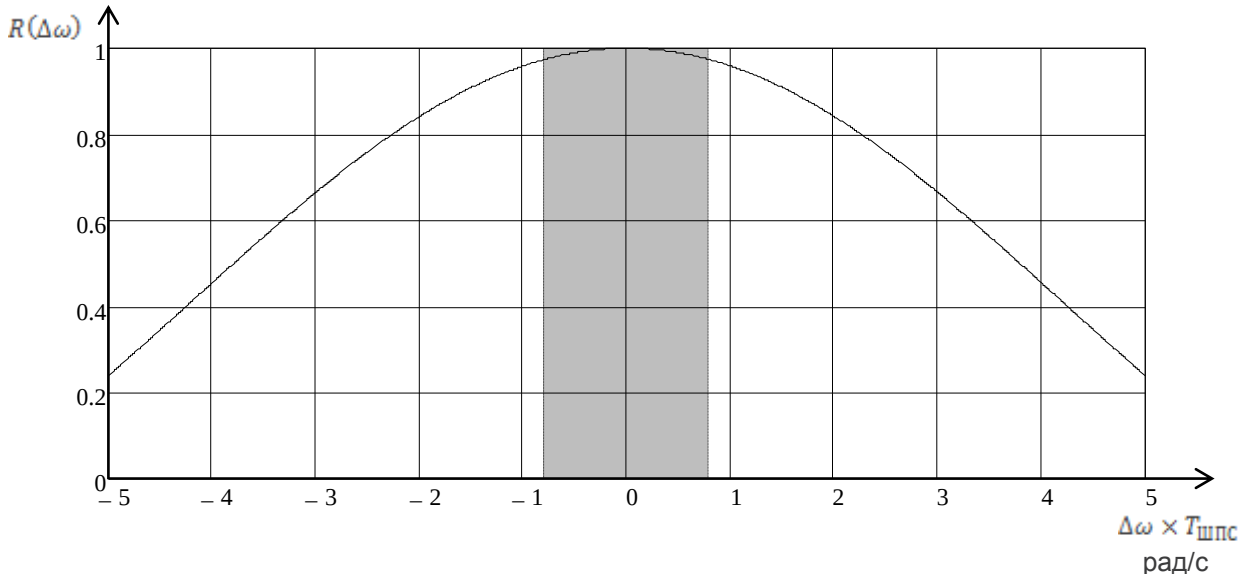


Рис. 5. Зависимость амплитуды отклика от частотного рассогласования.

Выражение (14) не учитывает того, что для демодуляции сигнала (в нашей постановке не используется немодулированная преамбула) необходимо, чтобы общее частотное рассогласование в радиолинии не превышало:

$$\Delta\omega_{\text{пред}} \leq \frac{\alpha \times \Delta\varphi}{T_{\text{ШПС}}} \text{ (рад/с).} \quad (15)$$

Закрашенной области соответствует область допустимого рассогласования частот для ФМ-4 при α = 1, сверх которого демодуляция сигналов не обеспечивается даже в канале без шумов.

В случае если рассогласование частот находится в допустимой области, энергетические потери могут быть уменьшены за счет системы точной подстройки частоты.

Так, на границе области при α = 1, энергетические потери в приведенном примере составят около 0,5 дБ, за счет точной подстройки, обеспечивающей α = 0,1 потери составят не более 0,1 дБ. Сигнал для точной подстройки частоты может быть получен из разности фаз между соседними откликами на выходе согласованного фильтра.

Для проведения грубого поиска сигналов, обеспечивающего выполнение условия (15) необходимо провести анализ *K* частотных каналов, где

$$K = 2\pi\Delta f_{\text{р}} / \Delta\omega_{\text{пред}} \quad (16)$$

Из приведенных данных видно, что при $N_{\text{ПСП}} = 63$, $T_{\text{ШПС}} = 4{,}2$ мкс (скорости передачи 476,2 кбит/с), частотной нестабильности в радиолинии 60 кГц, необходимо провести анализ $K = 8$ (заданная α = 0,25) или $K = 20$ (заданная α = 0,1) частотных поддиапазонов (грубый поиск частоты) и выбрать тот, для которого отклик R(Δω) является максимальным.

При $N_{\text{ПСП}} = 511$, $T_{\text{ШПС}} = 34$ мкс (скорости передачи 58,7 кбит/с), необходимо соответственно, провести анализ $K = 65$ (заданная α = 0,22) $K = 164$ (заданная α = 0,1).

К сожалению, зависимость амплитуды откликов на выходе согласованного фильтра от частотного рассогласования является достаточно слабой, и при наличии шумов и помех и ограничениях на допустимое время поиска вероятность правильного обнаружения требуемого поддиапазона может быть недостаточной.

Это затрудняет построение системы синхронизации, использующей при «грубом поиске» для своих оценок амплитуду откликов на выходе согласованного фильтра.

Для уменьшения времени поиска и повышения вероятности правильного обнаружения и частотной синхронизации ШПС в настоящей работе используется система грубой подстройки частоты, работающая на основе оценки входной вероятности ошибки декодером Витерби, формирующим метрику ветви [2]. Метрика ветви – это расстояние Хэмминга между принятым кодовым символом и соответствующим кодовым словом из решетки декодера.

Из-за особенностей работы декодера Витерби разности метрик на решетке декодера ограничены, поэтому для оценки входной вероятности ошибки можно использовать любую метрику ветви из решетки декодера. При заданной входной вероятности ошибки, метрика ветви и её дисперсия растут пропорционально количеству поданных на вход декодера данных.

Результат моделирования для сверточного кодирования с избыточностью кодирования $r = 2$ при подаче на вход декодера 1000 символов кода приведен на рисунке 6.

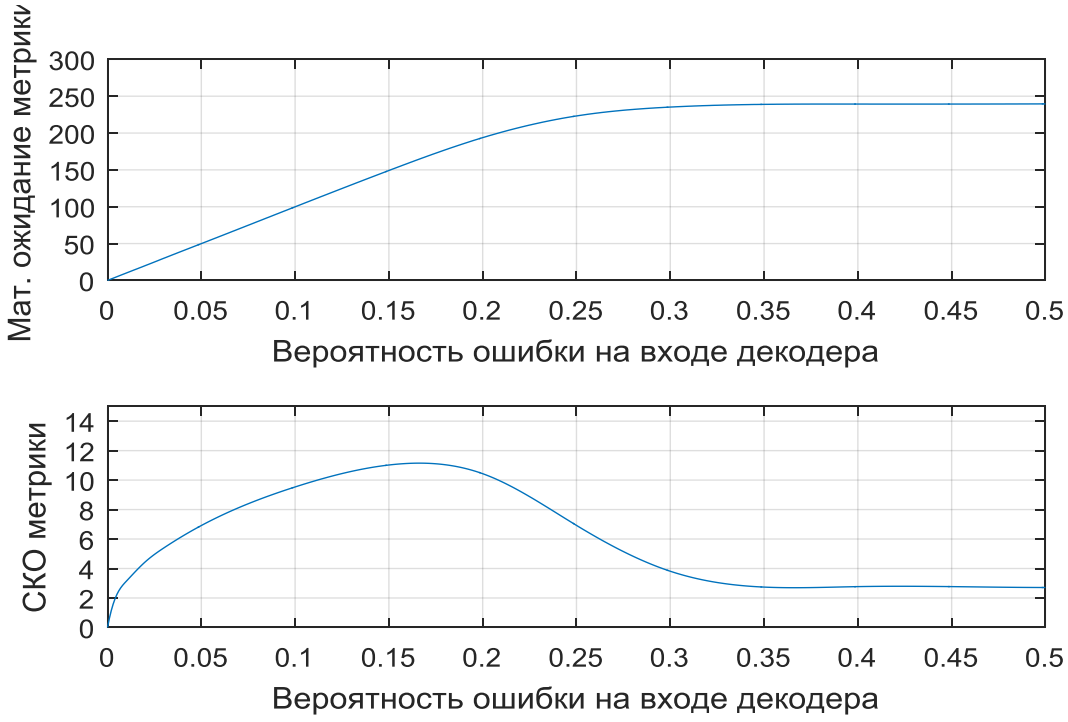


Рис. 6. Зависимость математического ожидания и среднеквадратического отклонения метрики ветви от входной вероятности ошибки.

Отметим, что при использовании турбокодов в качестве аналога метрики ветви может использоваться такой параметр, как количество итераций декодирования.

Можно показать, что при использовании в системе синхронизации радиолинии с прямым расширением спектра метрики ветви для обеспечения вероятности правильного обнаружения не менее 0,99 при входном отношении сигнал/шум равном минус 12 дБ с $N_{ПСП} = 63$ и входном отношении сигнал/шум, равном минус 16 дБ, с $N_{ПСП} = 511$, время установления синхронизма в радиолинии составляет не более $1000 \times T_{шпс} \times 2K$.

При использовании системы синхронизации, использующей при «грубом поиске» для своих оценок амплитуду откликов на выходе согласованного фильтра, время установления синхронизации увеличивается в 10…15 раз.

Таким образом, расчетное время грубой синхронизации радиолинии с максимальным отклонением частоты ±60 кГц и с $N_{ПСП} = 63$ составит не более 85 мс, что представляется приемлемым даже при длительности сеансов связи в несколько секунд. Время установления синхронизма в радиолинии $N_{ПСП} = 511$ составит не более 150 мс.

Таблица 7. Результаты лабораторных испытаний.

Отношение сигнал/шум, дБ	**P_b на входе декодера Витерби**	**P_b на выходе декодера Витерби**	**P_b на выходе декодера RS(255, 247)**	**P_b на выходе декодера RS(255, 235)**
–7,15	2×10^{-4}	$< 10^{-7}$	$< 10^{-7}$	$< 10^{-7}$
–8,18	9×10^{-4}	$< 10^{-7}$	$< 10^{-7}$	$< 10^{-7}$
–9,15	3×10^{-3}	$< 10^{-7}$	$< 10^{-7}$	$< 10^{-7}$
–10,12	$7{,}7\times10^{-3}$	$5\cdot10^{-6}$	1×10^{-6}	3×10^{-7}
–11,1	$1{,}6\times10^{-2}$	4×10^{-4}	7×10^{-5}	2×10^{-6}
–12,05	$3{,}2\times10^{-2}$	4×10^{-3}	$2{,}3\times10^{-2}$	4×10^{-4}
–12,95	$5{,}5\times10^{-2}$	$1{,}6\times10^{-2}$	$1{,}5\times10^{-2}$	$1{,}6\times10^{-2}$
–13,95	8×10^{-2}	> 0,1	> 0,1	> 0,1

В соответствии с приведенными расчетными данными был изготовлен экспериментальный образец модема ШПС с прямым расширением спектра со следующими свойствами:

- $N_{ПСП} = 63$;
- каскадный кодер;
- алгоритм грубого поиска сигнала с использованием метрики ветви;
- алгоритм точной подстройки, основанный на измерении разности фаз между соседними откликами на выходе согласованного фильтра.

В таблице 7 и на рисунке 7 приведены результаты лабораторных испытаний модемов ШПС с $N_{ПСП} = 63$.

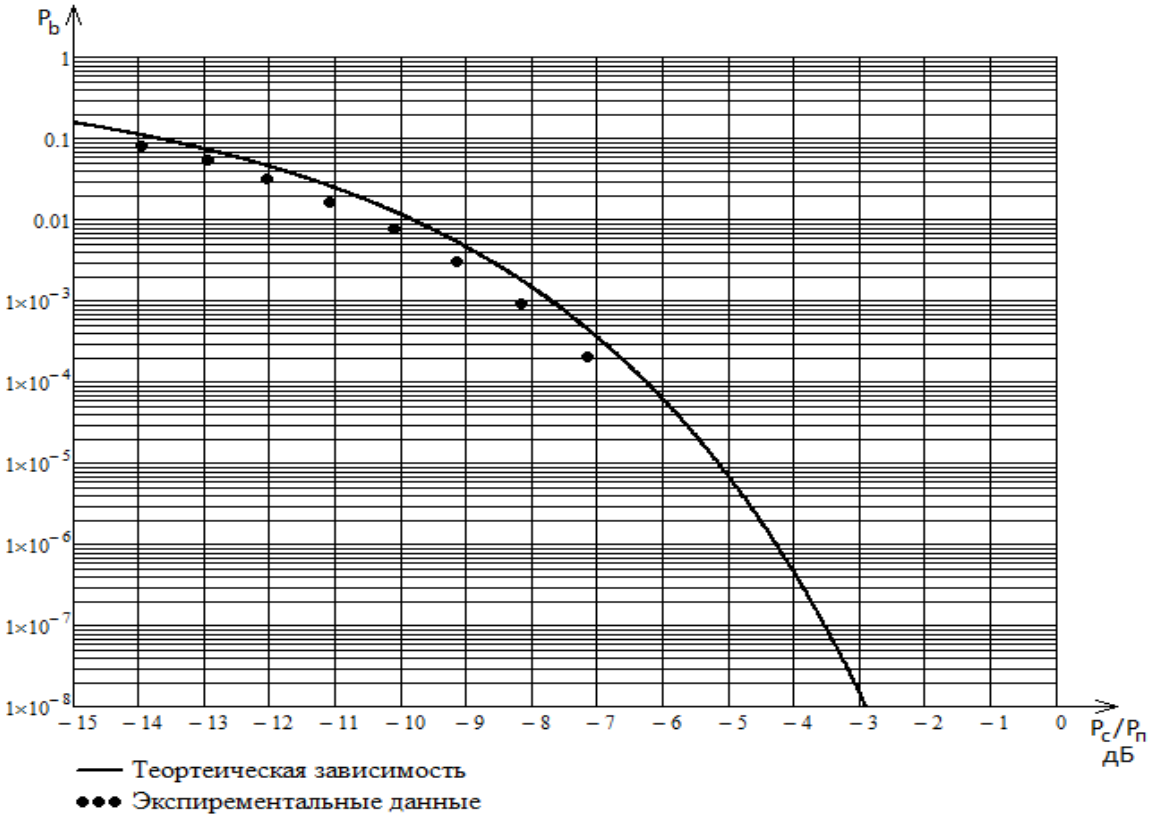


Рис. 7. Результаты лабораторных испытаний.

Выводы

Испытания экспериментальных образцов модемов ШПС с $N_{ПСП} = 63$ полностью подтверждают расчетные оценки помехоустойчивости.

Приведенные результаты совместной оптимизации базы широкополосных сигналов, размерности ансамбля сигналов, используемых для передачи, избыточности и алгоритмов канального кодирования могут быть использованы для проектирования сетей сеансной связи.

При использовании эффективной системы канального кодирования (турбокодирования в соответствии со стандартом DVB-S2) проигрыш системы с прямым расширением спектра системам с $M = 512$ квазиортогональными сигналами составит не более 1-2 дБ.

При этом аппаратная реализация системы с прямым расширением спектра существенно проще, что важно при создании линий связи с ЛА.

Литература

1. Варакин Л.Е. Системы связи с широкополосными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. : Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. – 1104 с.
3. Вишневский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации, М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
4. Ипатов В. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. М.: Техносфера, 2007. – 488 с.

УДК 004.932

Шахрай В.И., к.т.н.
Миколайчук Д.В.

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ЕГО АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В статье рассмотрен вариант алгоритма автоматической привязки изображений для реализации в составе вертолетной системы точного висения. Алгоритм основан на корреляционно-экстремальном методе сравнения текущего изображения с заданным эталонным описанием сцены. Приведены результаты моделирования работы алгоритма и даны рекомендации по его реализации в составе информационно-вычислительного блока вертолетной системы точного висения.

Введение

Обеспечение режима автоматической привязки изображений связано с использованием технологий машинного зрения. Основной составляющей эталонного обеспечения для такого режима является набор моно- и стереоизображений наземных сцен – аэрокосмических снимков высокого разрешения. В работах [1, 2] показано, что для формирования банка данных изображений наземных сцен наиболее стабильными характерными признаками

объектов являются их геометрические характеристики и параметры взаимного расположения объектов на сцене.

Эталонное описание может быть представлено в виде оперативного эталона (ОЭ), представляющего собой фрагмент изображения объекта, полученного с помощью оптико-электронных систем пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов (ЛА). Примером применения таких методов автоматической привязки является съемный комплект вертолетной системы точного висения (СТВО), созданного в ЗАО МНИТИ.

Постановка задачи

С целью расширения функциональных возможностей в СТВО необходимо реализовать режим автоматического поиска и обнаружения реперов, заданных оперативными эталонами. Алгоритм автоматического обнаружения реперов может быть введен в состав алгоритмического обеспечения информационно-вычислительного блока (ИВБ). Решение задачи поиска и обнаружения реперов по оперативному эталону обеспечивает автоматизацию выполнения монтажных и спасательных операций, посадки вертолета на ограниченных площадках. Программно-аппаратная структура информационно-вычислительного блока СТВО позволит реализовать дополнительные возможности для повышения эффективности и безопасности выполнении целого ряда работ на вертолете, в том числе, с грузом на внешней подвеске.

Решение задачи

Блок-схема алгоритма автоматического поиска реперов «СТВО-ОЭ», адаптированного под программно-аппаратную структуру информационно-вычислительного блока системы висения, представлена на рисунке 1.

Ниже приводится пошаговое описание алгоритма.

Шаг.1 Запись текущего изображения (ТИ).

На каждом видеокадре выполняется запись фрагментов текущего изображения форматом 64x64 элемента. Количество фрагментов ТИ, записываемых в одном кадре определяется аппаратными ресурсами блока и для вычислителя координат ИВБ равно 3. Общее число фрагментов *K* равно 48 (6x8). Таким образом, один цикл автоматического обнаружения объекта выполняется за 16 ТВ-полей или за 320 миллисекунд. Количество циклов автоматического поиска объекта определяется полетным заданием летательного аппарата.

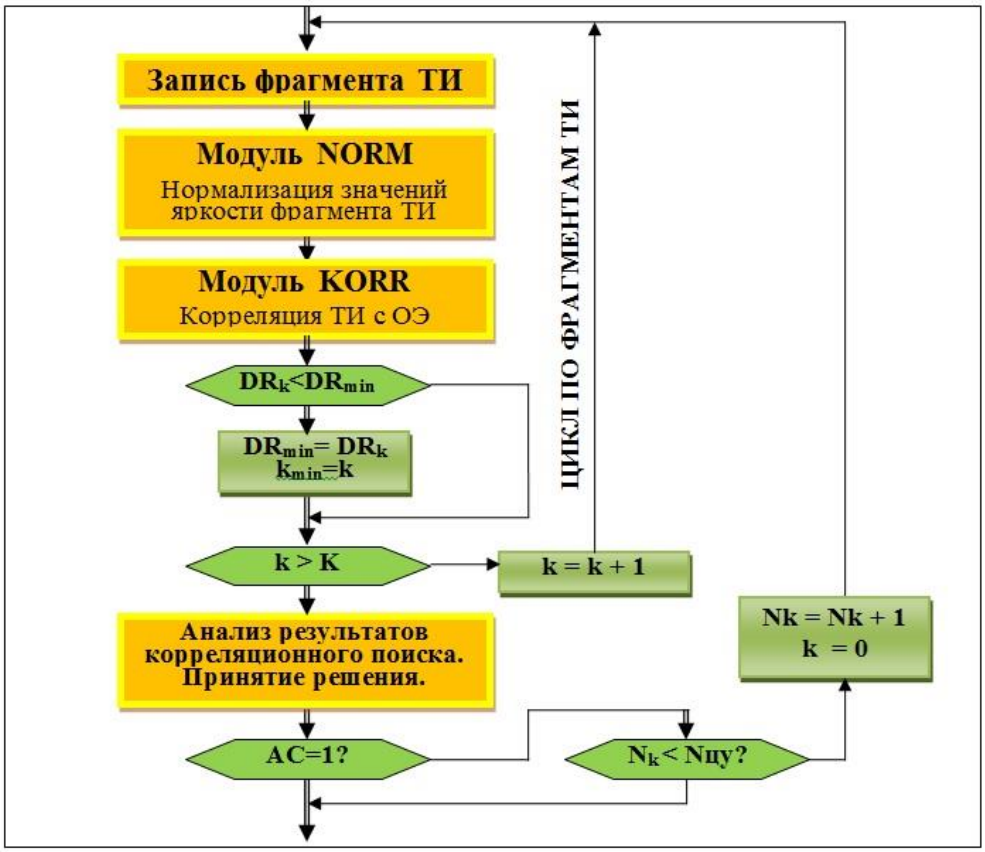


Рис. 1. Блок-схема алгоритма автоматического поиска реперов «СТВО-ОЭ».

Шаг 2. Нормализация ТИ.

Нормализация яркостной гистограммы каждого ТИ выполняется с целью минимизация влияния яркостных изменений в текущем изображении по отношению к эталону. Нормализация может быть выполнена тремя методами:

– линейной растяжкой гистограммы;

– нормализацией гистограммы;

– выравниванием (эквализацией) гистограммы.

Линейная растяжка сводится к присваиванию новых значений интенсивности каждому пикселю изображения. Для этого достаточно пересчитать старые значения интенсивности для всех пикселей согласно формуле

$$g_{xy} = a \cdot f_{xy} + b, \qquad (1)$$

где a,b просто вычисляются, исходя из сдвига границы $\boldsymbol{i_1}$ в 0, а $\boldsymbol{i_2}$ – в 255.

Нормализация гистограммы обеспечивает растяжку наиболее информативной части диапазона изменения интенсивностей. Бины, соответствующие редко встречающимся интенсивностям, в процессе

нормализации отбрасываются, далее выполняется обычная линейная растяжка получившейся гистограммы.

Выравнивание гистограммы обеспечивает одинаковую частоту уровней яркости, при этом гистограмма соответствует равномерному закону распределения. Для изображения *N*x*M* пикселей с числом уровней квантования яркости (числом бинов) *J* в результате эквализации в среднем на каждый уровень яркости должно выпадать $n_{uvter} = \frac{N \cdot M}{J}$ пикселей. При этом исходная плотность распределения $w_x(x)$ преобразуется в желаемую плотность $w_y(y)$:

$$w_y(y) = \begin{cases} \frac{1}{y_{max} - y_{min}}, y_{min} \ll y \ll y_{max} \\ 0, \text{ в противном случае} \end{cases}, \quad (2)$$

Рисунок 2 иллюстрирует результаты эквализации гистограмм изображений.

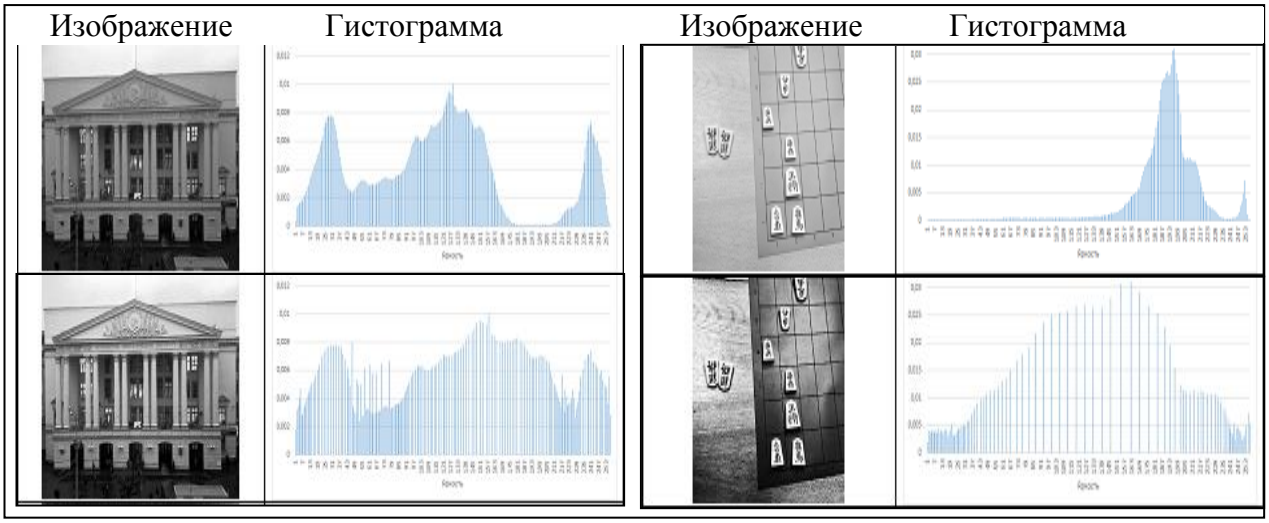


Рис. 2. Эквализация гистограмм изображений.

Нелинейные яркостные преобразования, характерные для третьего метода, могут отрицательно сказаться на вычислении разностной критериальной функции сходства текущего и эталонного изображений. Поэтому в алгоритме «СТВО-ОЭ» реализован второй метод нормализации гистограмм (путем линейной растяжки) с селекцией редко встречающихся значений яркости. Результат нормализации фрагмента ТИ иллюстрируется рисунком 3.

Рис. 3. Нормализация текущего изображения.

Шаг 3. Корреляция ТИ с ОЭ.

Нахождение экстремума взаимной корреляционной функции (ВКФ) текущего изображения с оперативным эталоном на шаге 3 реализуется модулем KORR. При размерах текущего изображения 64x64 элемента и поля эталона 32x32 элемента зона поиска H_0 алгоритма автоматического обнаружения составляет ± 16 элементов.

С помощью модуля KORR выполняется корреляция *k*-го фрагмента текущего изображения с оперативным эталоном.

$$R^k(\alpha,\beta) = \sum_{i=1}^{I} |F_{\text{ти}}^k\{SPZ(i)+\alpha, SPY(i)+\beta\} - F_{\text{оэ}}(i)| \quad (3)$$

Экстремум корреляционной функции *k*-го фрагмента ТИ определяется как:

$$R_0^k = \min R^k(\alpha,\beta), (\alpha,\beta) \in H_0 \quad (4)$$

Координаты экстремума ВКФ R_0^k определяют координаты найденного объекта в поле фрагмента ТИ, где: $F_{\text{ти}}^k(i,j)$ – двумерный массив *k*-го ТИ в поле следящего окна; $F_{\text{оэ}}(i)$ – одномерный массив значений ОЭ; α, β – значения взаимного координатного сдвига ТИ и ОЭ; H_0 – зона поиска экстремума R_0^k.

Полученное значение экстремума $\boldsymbol{R_0^k}$ сравнивается с абсолютным экстремумом *Rmin*, найденным в предыдущих циклах и, в случае выполнения неравенства (R_0^k<*Rmin*), *Rmin* присваивается значение R_0^k. По окончании всех *K*-циклов определяется фрагмент ТИ, наиболее близкий к эталону по критерию минимума ВКФ. Значение найденного экстремума ВКФ для *k*-го ТИ заносится в таблицу откликов ВКФ.

Нахождение экстремума ВКФ k-го текущего изображения $F_{\text{ти}}^{k}$ с эталоном $F_{\text{оэ}}$ показано на рисунке 4. Также на данном рисунке представлен вид ВКФ для произвольного фрагмента ТИ.

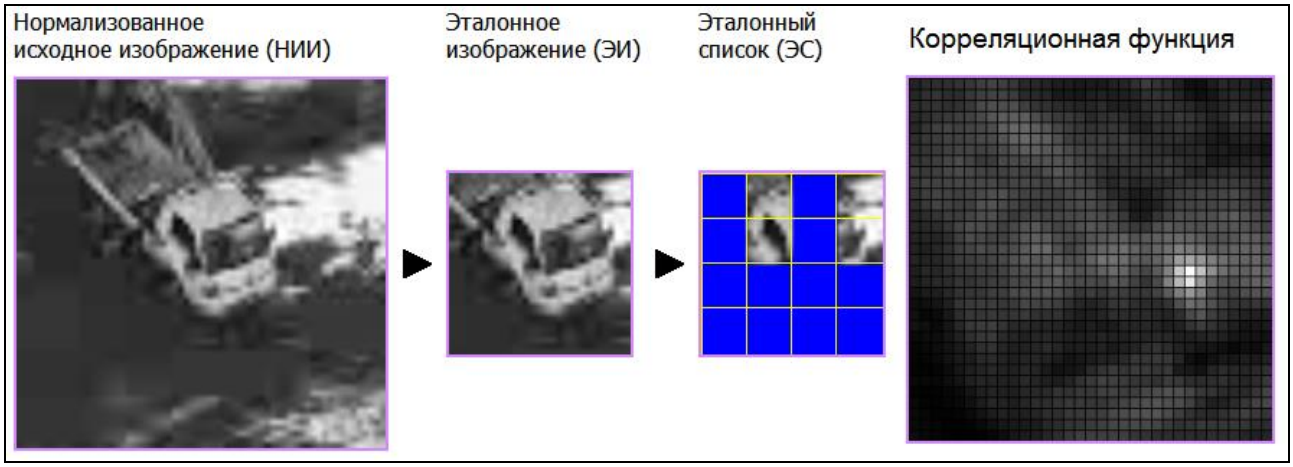


Рис. 4. Корреляция текущего изображения ТИ с эталоном.

Шаг 4. Анализ результатов корреляционного поиска.

После выполнения шага 3 для последнего ТИ значение наилучшего экстремума ВКФ *Rmin* сравнивается с заданным пороговым значением *Rпор*. Значение *Rпор* вычисляется при подготовке ОЭ в функции от значения автокорреляционной функции выбранного фрагмента на исходном изображении.

Для отработки методом математического моделирования режимов автоматического поиска разработано программное обеспечение (ПО) алгоритма «СТВО-ОЭ». ПО написано на языке C++ с использованием библиотеки Qt. Оно может использрваться на персональном компьютере типа IBM PC со следующей минимальной конфигурацией:

– процессор типа Intel не ниже Celeron E3200 (2,4 ГГц);

– оперативная память не менее 256 МБ;

– операционная система Windows XP или новее.

Моделирование выполняется с использованием видеофайлов, полученных в летных работах оптико-электронных систем.

На рисунке 5 изображено главное окно ПО «СТВО-ОЭ».

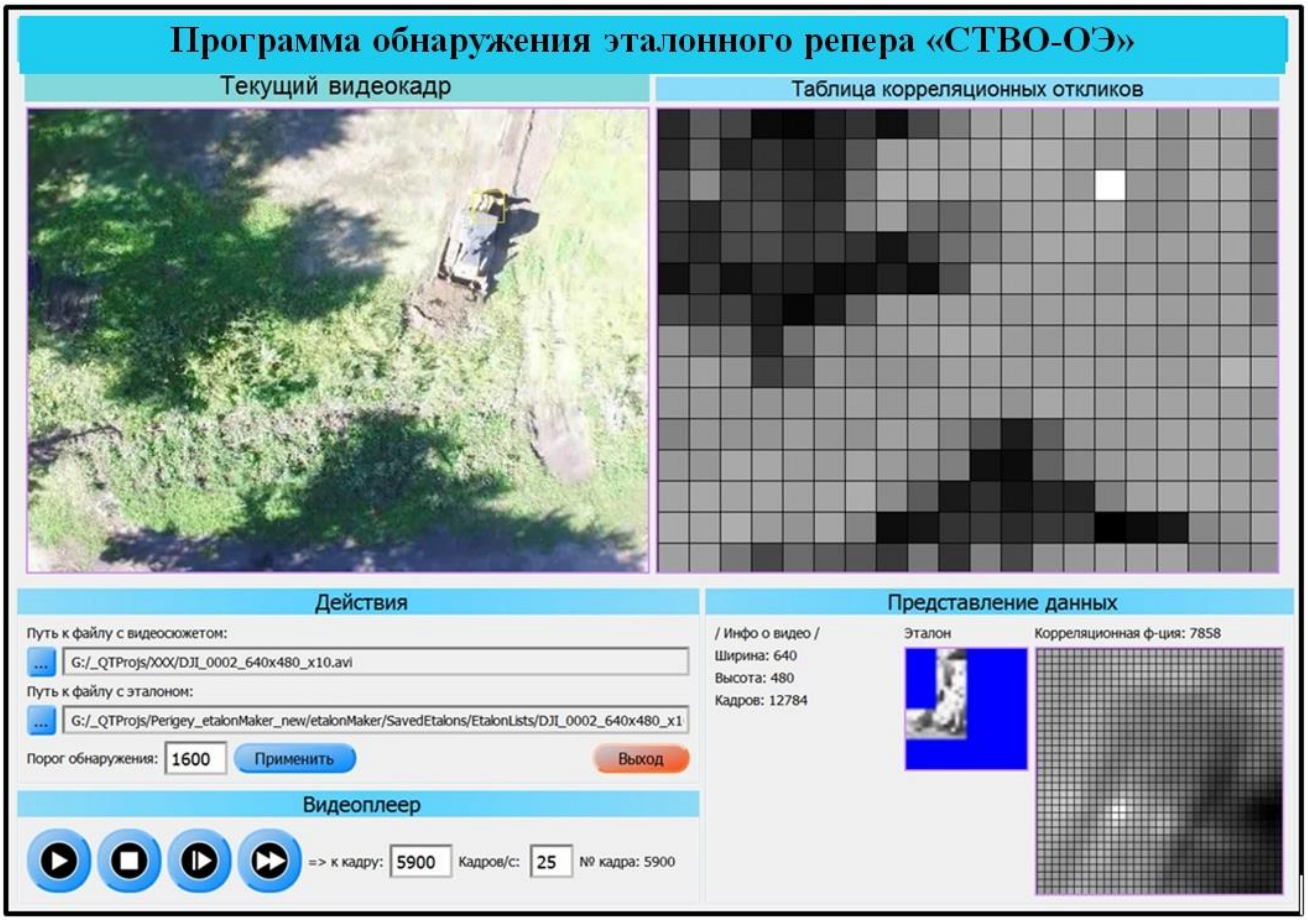


Рис. 5. Главное окно ПО «СТВО-ОЭ».

В поле главного окна представлены:

– текущий видеокадр;
– таблица корреляционных откликов в поле текущего кадра;
– эталонное изображение (выделены секции ЭИ, включенные в эталонный список);
– двумерная корреляционная функция в области текущего обрабатываемого ИИ, а также значение её экстремума.

Выбор видеофайла при моделировании обнаружения объекта-репера выполняется оператором с помощью обращения к базе данных с указанием начального и конечного обрабатываемых кадров. Выбор эталонных файлов для моделирования также выполняется оператором обращением к соответствующим разделам базы данных. В процессе моделирования в окне программы отображаются промежуточные результаты обработки.

Эксперименты по автоматическому обнаружению реперов по оперативному эталону проводились с использованием видеосюжетов, в

которые были включены следующие декоррелирующие факторы: поворот растра, изменение яркости, и ракурсные искажения.

АРМ подготовки оперативного эталона

Для формирования ОЭ разработано ПО автоматизированного рабочего места (АРМ) подготовки эталона. На рисунке 6 представлено главное окно программы «СТВО-ПЭ».

Рис. 6. Главное окно ПО «СТВО-ПЭ».

ПО «СТВО-ПЭ» располагает средствами для захвата и формирования эталона. Выбор исходного файла, на основании которого будет происходить формирование эталона, осуществляется нажатием на кнопку «Выбрать файл источника». В качестве такого файла подойдет одиночное изображение (*.bmp, *.jpg, *.png) или видеоряд (*.avi, *.mpeg). Работа с источником кадров происходит при помощи функций библиотеки OpenCV. Формирование эталонных списков происходит автоматически при выборе оператором области.

Обработка изображения с целью получения конечного эталона происходит в несколько этапов:

– определение области размером 64x64 точек исходного изображения (далее – ИИ);
– получение нормализованного исходного изображения (далее – НИИ) путем растягивания ИИ динамического диапазона на всю разрядную сетку;
– получение эталонного изображения (далее – ЭИ), размером 32x32 элементов, расположенного по центру ИИ;
– вычисление эталонного списка (далее – ЭС), состоящего из фрагментов размером 8x8 точек на основе корреляционного критерия.

Все описанные этапы визуализируются ПО в нижней части главного окна (рисунок 6).

Результаты моделирования

В таблице 1 приведены результаты работы модели при обработке видеофайлов с одним эталоном.

Таблица 1.

Видеофайл	**Кол-во кадров**	***D*, кадров**	***N0*, кадров**	***L0*, кадров**	***K***	***P*, %**
«Стройплощадка»	8726	437	337	172	0,83	77
«Мост»	2257	1641	1583	923	3,91	96
«Аэродром»	1597	229	218	63	0,33	95
«Город»	498	222	187	176	1,52	84

В таблице введены обозначения:

D – диапазон, в котором выполнялось обнаружение;

N0 – количество кадров, в котором произошло правильное обнаружение;

L0 – количество кадров с непрерывным верным обнаружением (не более 1 ошибки за 10 кадров);

P – оценка вероятности правильного обнаружения ($P = N0 / D$);

K – коэффициент изменения масштаба объекта обнаружения.

Для оценки вероятности обнаружения значение *N0* подсчитывалось с момента первого обнаружения.

Аппаратная реализация алгоритма

По результатам моделирования работы алгоритма «СТВО-ОЭ» его версия выла реализована в составе информационно-вычислительного блока ИВБ съемного комплекта вертолетной системы точного висения и обзора «СТВО-3». Внешний вид блока ИВБ представлен на рисунке 7.

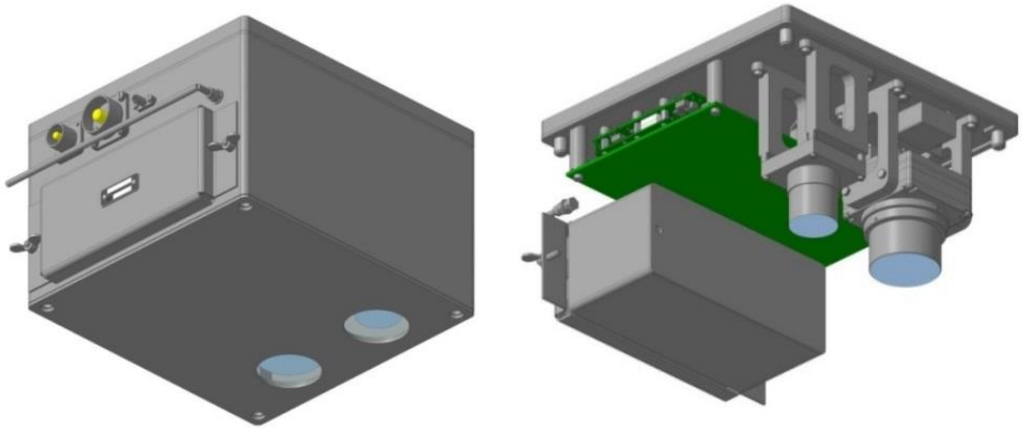


Рис. 7. Информационно-вычислительный блок ИВБ.

В состав информационно-вычислительного блока входит вычислитель координат, реализующий следующие основные алгоритмы [3]:

- многоканальный алгоритм автосопровождения реперов;
- алгоритмы информационного обмена с навигационной аппаратурой вертолета, аппаратурой отображения и регистрации видеоинформации;
- алгоритмы вычисления координатного смещения и скоростей линейного перемещения вертолета;
- алгоритм оценки высоты висения;
- алгоритмы формирования выходных управляющих сигналов.

Программно-аппаратная структура вычислителя координат позволила реализовать дополнительные возможности для повышения эффективности и безопасности выполнения целого ряда работ на вертолете, в том числе с грузом на внешней подвеске. При этом, оперативные эталоны формируются для каждого репера с помощью программы «СТВО-ПЭ» и вводятся в ИВБ при подготовке полетного задания.

На рисунке 8 представлен вид изображения на экране видеомонитора, где цифрой 3 обозначены метки автосопровождения двух реперов. Автосопровождение каждого из реперов выполняется идентичными каналами корреляционного вычислителя координат.

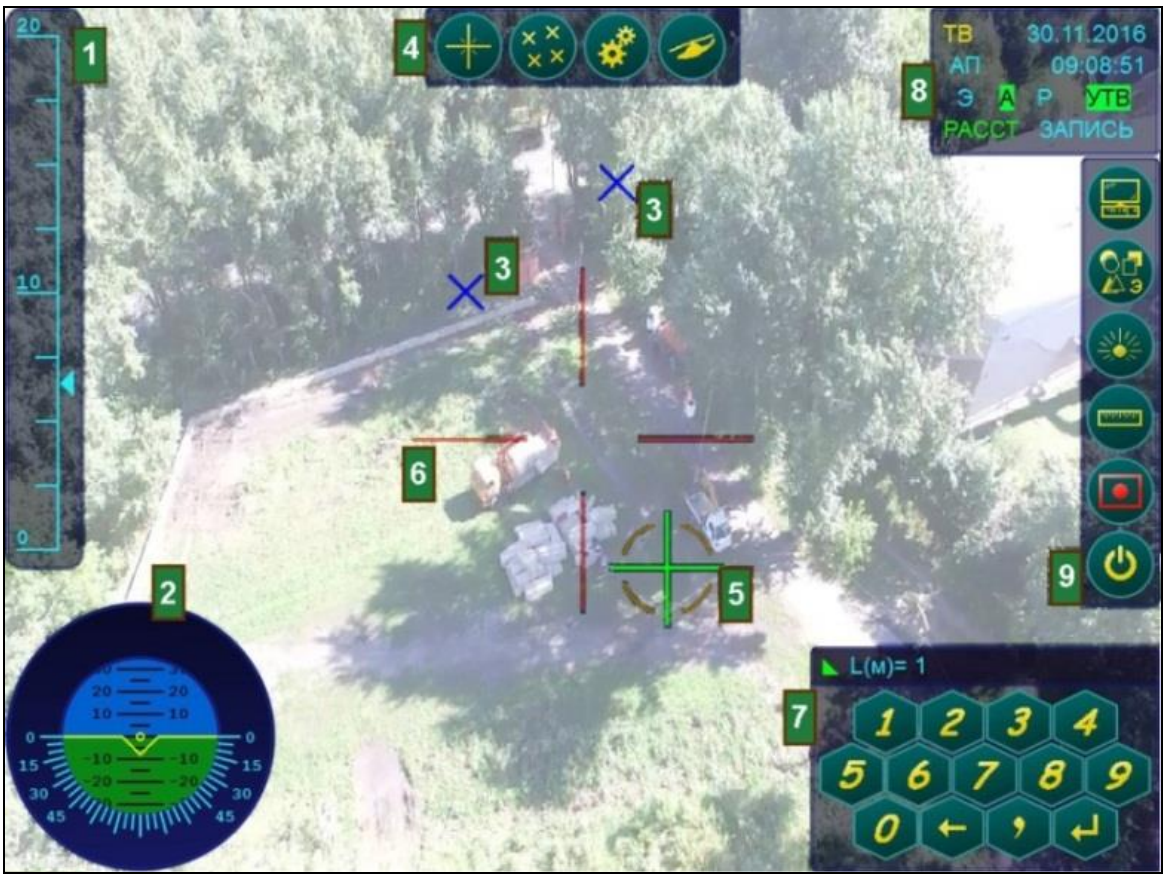


Рис. 8. Интерфейс оператора СТВО на экране видеомонитора.

Заключение

Моделирование работы алгоритма автоматической привязки изображений на основе вычисления разностной критериальной функции между исходным и эталонным фрагментированным изображениями показало способность алгоритма к устойчивому обнаружению реперов по оперативному эталону (вероятность более 70 %).

Автоматизация процесса точного висения обеспечивает безопасность полета при выполнении монтажных и спасательных операций, посадки на ограниченных площадках.

Литература

1. Инсаров В.В. Системы управления летательными аппаратами с использованием технологий машинного зрения // Сборник докладов Всероссийской научно-техническая конференция «Моделирование авиационных систем». Том 3. – М., 2011. – С. 101-107.

2. Гнилицкий В.В., Инсаров В.В., Чернявский А.С. Алгоритмы принятия решения в задаче селекции объектов на изображениях наземных сцен // Известия РАН. Теория и системы управления. № 6, 2010. – С. 143-151.
3. Шахрай В.И. Цифровая обработка изображений в системе точного висения вертолета // Цифровая обработка сигналов. Научно-технический журнал. № 2, 2011. – С. 18-22.

УДК 004.6

Барсуков А.Г. к.т.н., с.н.с.
Ковтун И.И. к.т.н., доц.
(Открытый Институт - ВПШ)

ФОРМАЛЬНЫЙ АППАРАТ ФУНКЦИОНАЛЬНО-РЕЛЯЦИОННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

В статье рассматриваются средства автоматизации управления проектами и предлагается методология проектирования автоматизированных систем на предприятиях оборонно-промышленного комплекса.

Одним из значимых требований, предъявляемых к методологии разработки автоматизированных систем (АС), является наличие эффективного механизма, позволяющего осуществлять описания как объекта автоматизации, так и различных компонентов проектируемой АС. Такой механизм должен позволять осуществлять описание с различных точек зрения, например, с точки зрения генерального конструктора, системных аналитиков и инженеров, а также в различных ракурсах, например, должны отдельно описываться техническая, программная, информационная и другие составляющие.

В качестве приемлемого решения для описания объекта автоматизации в процессе проектирования, разработки и создания АС могут быть использованы функциональные модели и основанные на них методологии. Наиболее известная из них методология IDEF0 [1, 2] явилась дальнейшим развитием графического языка описания систем SADT и была утверждена в качестве стандарта в рамках проведенной в США программы автоматизации

промышленных предприятий ICAM. Одним из требований к стандарту было наличие эффективной методологии взаимодействия системных аналитиков и других специалистов, занятых в рамках проекта. Как результат появилось много программных пакетов, которые служат для автоматизации процесса проектирования и разработки АС, например, средства проектирования Bpwin компании Platinum Technologies, Microsoft Office Visio компании Microsoft, в основу которых положена IDEF0 и другие функциональные модели.

Далее рассмотрено применение методологии IDEF0 на примере системы «Управление проектами». Пусть необходимо обеспечить автоматизированный учет большого количества проектов и управление их реализацией некоторой организацией, для чего установлены следующие исходные данные.

1. Регистрацию проекта, а также корректировку и удаление информации о нем осуществляет плановый отдел, формирование списка задействованных специалистов – руководитель проекта, а контроль исполнения мероприятий в рамках проекта – генеральный директор и руководитель проекта. Сначала плановый отдел регистрирует проект. Затем генеральный директор назначает руководителя проекта. Впоследствии генеральный директор и руководитель проекта контролируют ход его выполнения, для чего плановый отдел еженедельно формирует отчет о ходе его выполнения. В обязанности руководителя проекта входит также подбор специалистов.
2. Проект характеризуется номером и датой договора на его реализацию, генеральным заказчиком, названием, сроками, выделенными ассигнованиями, а также специалистами, задействованными в его рамках. Специалист характеризуется ФИО, должностью, стажем работы, специальностью по диплому и др. реквизитами. В одном проекте может быть задействовано много специалистов, а один специалист может участвовать в нескольких проектах.

Вариант применения к данному примеру модели IDEF0 представлен на рисунках 1 и 2.

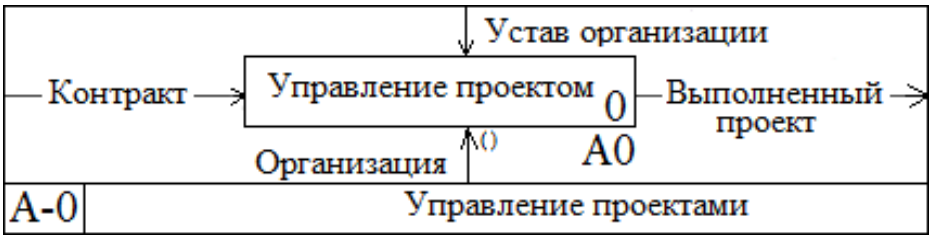


Рис. 1. Общее описание процессов примера «Управление проектами» в нотации IDEF0.

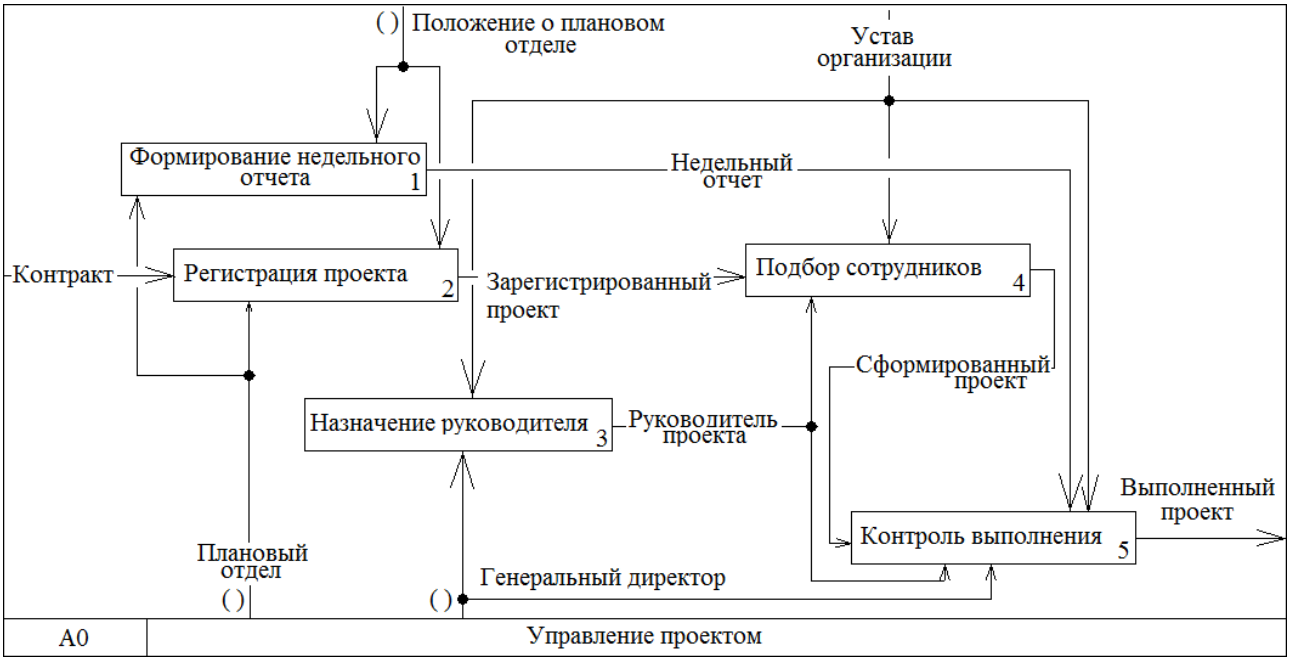


Рис. 2. Детализация процессов примера «Управление проектами» в нотации IDEF0.

Существенным ограничением функциональных моделей является то, что отображение некоторого объекта автоматизации в их рамках, как правило, не дает четкого понимания структуры проектируемой АС. Другими словами, в рамках формального языка IDEF0 не удается отобразить информацию пункта 2 рассмотренного примера.

Как решение проблемы, для представления информации широко используется реляционная модель данных. Одним из достоинств реляционной модели является возможность её представления в рамках теории множеств, что позволяет применить к ней формальный аппарат современной математики [3, 4], а другим – её практическая значимость, поскольку с её помощью описывается множество предметных областей, подлежащих моделированию в процессе автоматизации.

Не углубляясь в формальные тонкости реляционной модели, следует учесть проблемы её применения к примеру «Управление проектами». Так, в

рамках реляционной модели данных информация, представленная в пункте 2 приведенного примера, может быть отображена в виде, представленном на рисунке 3, в то время как отображение информации пункта 1 может вызвать серьезные затруднения. Обобщая, можно отметить, что существенным ограничением реляционной модели является невозможность наглядного описания с её помощью функциональной структуры проектируемой АС.

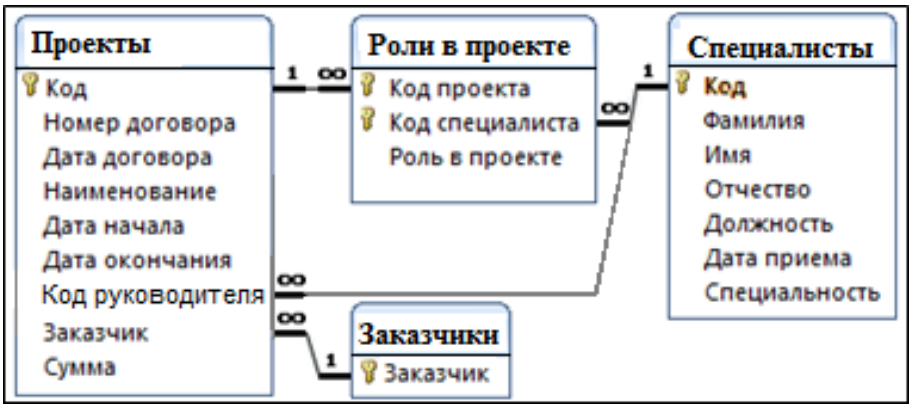


Рис. 3. Схема БД «Управление проектами».

Попытка преодолеть конструктивные ограничения методологии функционального моделирования IDEF0 и реляционной модели простым объединением диаграмм, представленных на рисунках 1-3, приводит к уменьшению эффективности формального аппарата для описания:

– порядка обработки элементов базы данных в течение некоторого проектируемого процесса;
– функциональной структуры проектируемой АС и назначения элементов пользовательского интерфейса, проектируемых в составе системы автоматизированных рабочих мест (АРМ).

Сложившаяся практика многократно увеличивает время общения между представителями заказчика и системными аналитиками, между системными аналитиками, алгоритмистами и программистами, что, в свою очередь, увеличивает сроки разработки проекта в целом.

Таким образом, возникает необходимость разработки методологии проектирования АС, объединяющей в рамках единого комплексного решения достоинства методологии IDEF0 и реляционного подхода.

Принципиальные решения такой методологии, в дальнейшем называемой функционально-реляционной методологией проектирования автомати-

зированных систем (FRT-методология, Functional Relational Technique, FRT), предложены в работах [5, 6] и состоят в следующем. В качестве модели объекта автоматизации предлагается совокупность иерархически упорядоченных и взаимосвязанных диаграмм, построенных в соответствии с методологией IDEF0. Для представления информации на диаграммах используется графический язык IDEF0, доработанный следующим образом.

1. Для функционального блока введен дополнительный признак – вид блока, который может принимать следующие значения: *Меню, Контейнер, Регистрация*, *Удаление*, *Изменение*, *Запрос, Внешний ключ, Неавтоматизированная функция*. Вид декомпозируемого блока может принимать значения *Меню, Контейнер* и *Неавтоматизированная функция*. Вид недекомпозируемого блока – *Регистрация*, *Удаление*, *Изменение*, *Запрос, Внешний ключ, Неавтоматизированная функция*.

В случае, когда вид блока принимает значение «Неавтоматизированная функция», функциональный блок имеет тот же смысл, что и блок, построенный в соответствии с методологией IDEF0.

В остальных случаях вид блока дополнительно указывает на то, что функция, соответствующая функциональному блоку, предполагается к исполнению проектируемой АС. При этом, вид блока будет определять пользовательский интерфейс такой системы в соответствии со множеством заранее предопределенных и однозначно связанных с ним правил. Особенности же пользовательского интерфейса будут детализированы данными правилами в зависимости от входящих-исходящих стрелок.

2. Для каждого функционального блока вводится еще один дополнительный признак – база блока.

База декомпозируемого блока, имеющего вид блока, отличный от неавтоматизированной функции, представляет собой предполагаемое к обработке данным блоком подмножество реляционных таблиц, представленное в третьей нормальной форме реляционной модели данных, или описанное на DDL компоненте языка SQL. В таком случае база контекстного блока может представлять собой полную схему базы данных, а база дочернего блока – подмножество взаимосвязанных таблиц родительского блока.

База недекомпозируемого блока, имеющего вид блока, отличный от неавтоматизированной функции, представляет собой модель кортежа, имя

отношения или выражение Select языка SQL. Поясним вводимое понятие модели кортежа. Например, для таблицы «Проекты» (рисунок 3) моделью кортежа будет множество именованных слотов. Если операция, соответствующая функциональному блоку, вызывает изменение некоторого атрибута отношения, то в квадратных скобках именованного слота модели кортежа, соответствующего такому атрибуту, устанавливается значение 1, в противном случае – 0. Введение понятия модели кортежа необходимо в целях моделирования операций внесения и изменения кортежей в отношениях.

База блока, в котором вид блока имеет значение «Неавтоматизированная функция», представляет собой некоторый текстовый комментарий.

3. В качестве механизма могут быть указаны как автоматизированные рабочие места, которые предполагается создать в рамках проектируемой АС (схематически обозначаются меткой [АРМ]), так и сущности, обобщающие в себе несколько АРМ или иные сущности, допустимые в соответствии с методологией IDEF0.

Графическое представление вида блока и базы блока показано на рисунке 4.

Рис. 4. Общее описание процессов примера «Управление проектами» в нотации FRT.

Применяя FRT-методологию к представленному примеру, можно получить взаимосвязанное множество диаграмм, наиболее значимые из которых представлены на рисунках 4-5.

На контекстной диаграмме (рисунок 4), показано, что в процессе обследования была описана предлагаемая к разработке АС «Управление проектами», информационная база которой моделируется четырьмя взаимосвязанными реляционными таблицами. На диаграмме А0, показано, что

разрабатываемая система предполагает наличие трех АРМ: планового отдела, генерального директора и руководителя проекта. АРМ планового отдела должно осуществлять регистрацию проектов, реализуемых в организации, а также подготавливать отчет о ходе выполнения проектов, АРМ генерального директора – назначать руководителя и осуществлять контроль исполнения проектов, АРМ руководителя проекта – формировать список участников проекта, а также обеспечивать контроль их работы.

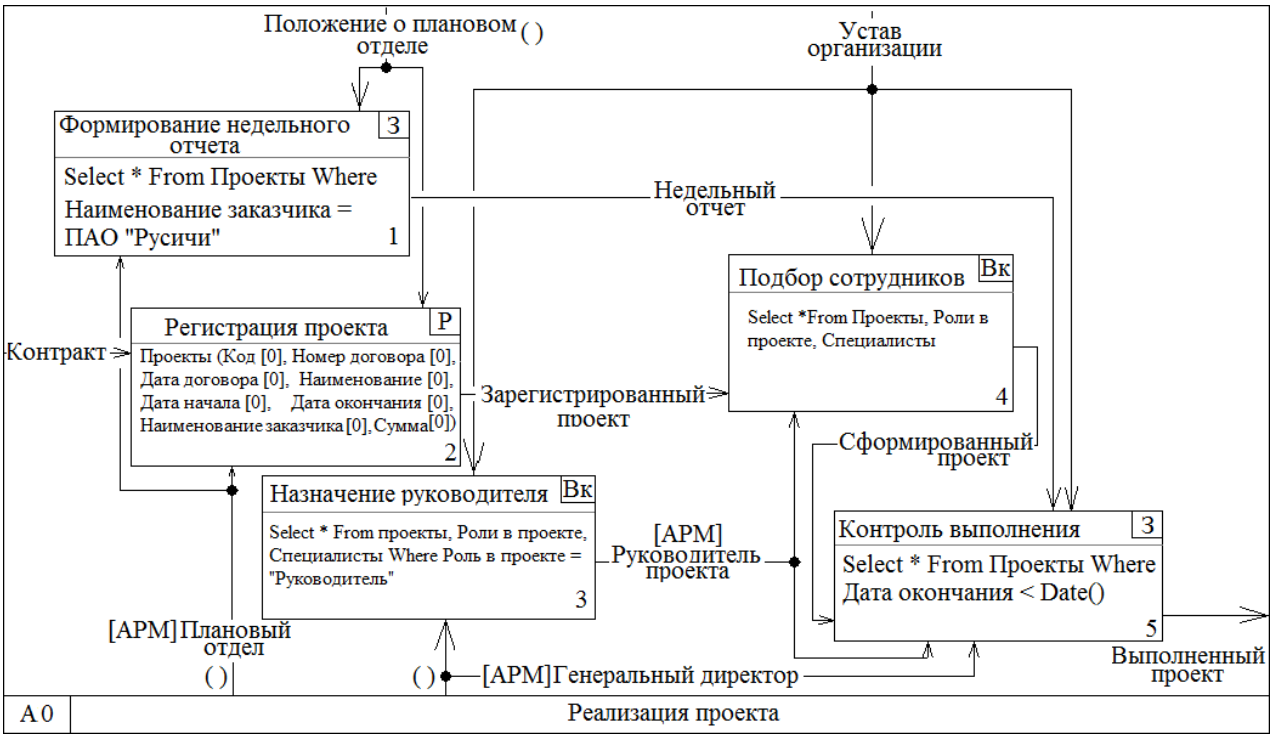


Рис. 5. Детализация функционального блока 0 в нотации FRT.

Детализация информации, представленная на рисунке 5, позволяет также определить пользовательские интерфейсы АРМ проектируемой АС. Как отмечено выше, интерпретация представленной на данном рисунке диаграммы зависит от видов блоков FRT-модели и определяется правилами построения пользовательского интерфейса (правилами ППИ), в том числе следующими:

– в случае, когда некоторый функциональный блок представлен в виде *Меню*, ему соответствует меню пользовательского интерфейса, элементами которого являются названия дочерних функциональных блоков;
– в случае, когда некоторый функциональный блок представлен в виде *Контейнер*, ему соответствует окно, в котором пользователь может

просмотреть все кортежи помеченного специальным образом отношения, указанного в базе блока и, при этом, некоторым образом выделить один из кортежей, сделав его активным (С помощью кнопок обеспечивается вызов других окон, которые обеспечивают модификацию данного отношения, и отношений, связанных с ним.);

– в случае, когда некоторый функциональный блок представлен в виде *Регистрация*, ему соответствует окно с полями, соответствующими именованным слотам модели кортежа, указанного в базе блока, а также кнопками *Ввести* и *Отменить*. (При нажатии на кнопку *Ввести*, происходит проверка состояния базы на соответствие условиям целостности и непротиворечивости информации с учетом вводимой записи, при положительном результате которой происходит добавление такой записи).

Применение указанных правил ППИ, например, к функциональным блокам *Управление проектом* (рисунок 4) или *Регистрация проекта* (рисунок 5) приведет к созданию интерфейса АРМ планового отдела, представленного на рисунке 6.

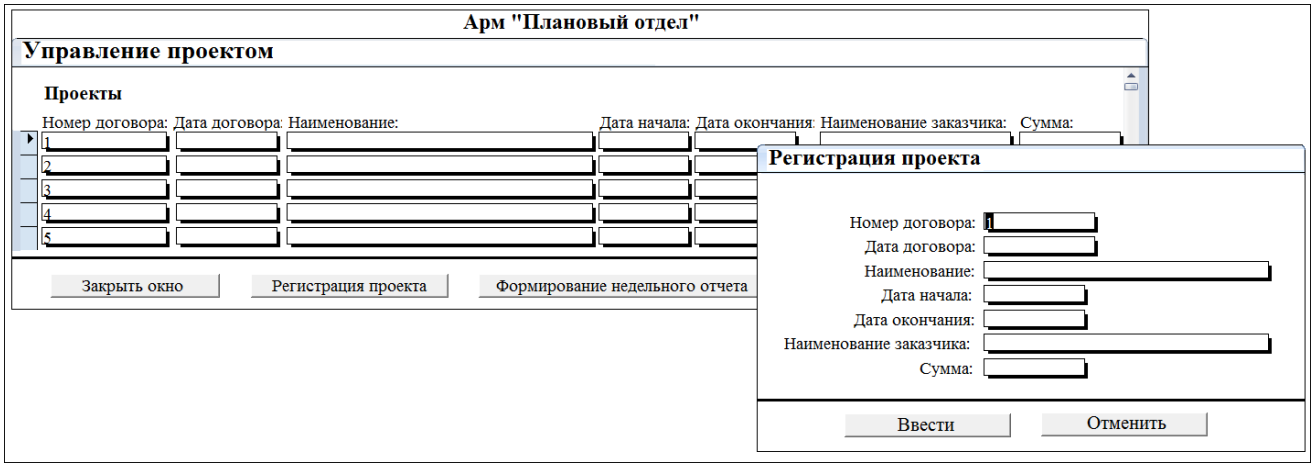


Рис. 6. Интерфейс АРМ Планового отдела, полученный в результате применения правил ППИ к функциональным блокам *Управление проектом*, рис. 4, и *Регистрация проекта*, рис. 5.

Применение реляционной модели данных в качестве метамодели для представления графических конструкций (рисунок 7) позволяет получить дополнительный весомый эффект, а именно, использовать формальный аппарат реляционного моделирования, в том числе реляционную алгебру, реляционное исчисление кортежей, и язык SQL для решения следующих задач.

1. Строгое описание АРМ с целью автоматической генерации их прикладного программного обеспечения.
2. Анализ объекта автоматизации с целью оптимизации движения материальных и информационных потоков.
3. Анализ объекта автоматизации с целью оптимизации структуры проектируемой АС.
4. Технико-экономическое обоснование проектов по автоматизации объектов обследования.

Так, в частности, рациональность использования реляционной модели в качестве метамодели может быть наглядно показана посредством применения языка SQL для решения обозначенных выше задач. С этой целью можно сформулировать запросы, которые требуются для решения задач первого типа, то есть задач, связанных с автоматической генерацией прикладного программного обеспечения АРМ. При этом, сначала формулируется запрос на естественном языке или, другими словами, осуществляется постановка задачи, а затем создается запрос к базе данных (рисунок 7) на языке SQL, результат которого представляет собой решение такой задачи.

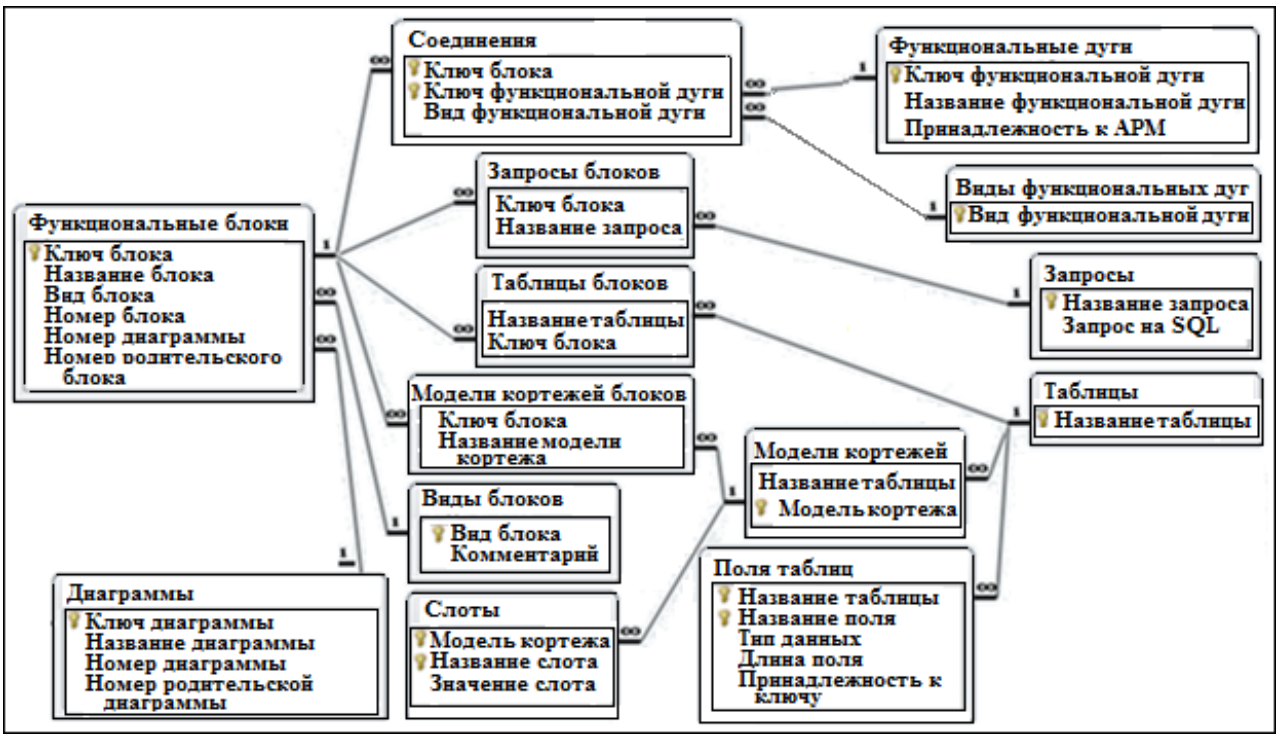


Рис. 7. Функционально-реляционная модель данных, представленная реляционной.

Для решения задач второго типа, а именно, для проведения формального анализа объекта автоматизации с целью оптимизации движения материальных,

финансовых и информационных потоков могут оказаться полезными следующие запросы.

1. Составить перечень АРМ, реализующих заданную операцию.

2. Оценить степень автоматизации производства.

В процессе решения задач третьего типа окажутся полезными следующие запросы.

1. Посчитать количество АРМ проектируемой информационной системы.

2. Отобразить перечень АРМ проектируемой информационной системы.

3. Посчитать количество операций, выполняемых некоторым АРМ.

4. Отобразить перечень операций, выполняемых некоторым АРМ.

Для проведения технико-экономического обоснования проектов по автоматизации объектов обследования в рамках функционально-реляционного проектирования целесообразно применить возможности, предоставляемые моделью IDEF0. Так, в рамках методологии функционального моделирования IDEF0 разработан метод оценки затрат на производство некоторого продукта, суть которого состоит в следующем. Для оценки затрат обеспечена возможность ведения словаря статей расходов, для каждого функционального блока – возможность определения его числа повторений в рамках родительского блока, а также показаны затраты на операцию, соответствующую функциональному блоку, по каждой статье расходов. Тогда стоимость некоторого технологического процесса будет определяться как сумма произведений стоимостей всех дочерних процессов на количество их повторений в рамках родительского процесса, где стоимость дочернего процесса определяется как сумма затрат такого процесса по всем статьям расходов:

$$Stexn = \sum_{i=1}^{m} Sd_i Td_i, \qquad (1)$$

где

$$Sd_i = \sum_{j=1}^{n} Ss_{ij}, \;\; i = 1,m. \qquad (2)$$

Построив функциональную модель объекта обследования до проведения автоматизации и функциональную модель с учетом предполагаемой

автоматизации, можно оценить затраты на производство в том и другом случае. Далее, имея сведения о стоимости проекта, можно сделать выводы о его рентабельности и окупаемости.

Матрично-реляционная методология проектирования, наряду с методом оценки затрат на производство некоторого продукта, дополнительно предоставляет математический аппарат, позволяющий решать задачи по минимизации затрат на производство продукции.

Таким образом, построив функционально-реляционную модель объекта обследования для нескольких вариантов автоматизации, можно оценить минимальные затраты на производство продукции и минимальное количество операций, выполняемых неавтоматизированным способом, для каждого из предлагаемых вариантов, а также установить перечень функций, которые, при этом, следует закрепить за каждым из механизмов. На основании полученной информации можно сделать более аргументированные выводы о предпочтительности того или иного варианта автоматизации объекта обследования.

Выводы

Обобщая вышеизложенные предложения, можно представить суть функционально-реляционной методологии проектирования АС, которая состоит в осуществлении последовательности следующих шагов.

1. Построение функционально-реляционной модели объекта автоматизации, наличие которой позволит сформировать у коллектива разработчиков проектируемой АС однозначное представление об объекте автоматизации и исключить различное толкование тех или иных процессов.
2. Оценка построенной модели на предмет эффективности действующей системы информационных и материальных потоков, и корректировка модели по результатам оценки.
3. Анализ объекта автоматизации на предмет оптимизации структуры АС и корректировка модели по результатам оценки. Такой анализ возможен, поскольку функционально-реляционная модель объекта автоматизации однозначно определяет функциональную структуру проектируемой АС.
4. Автоматическая генерация программного обеспечения АРМ АС с последующим моделированием на его основе работы будущей АС

ограниченным числом разработчиков еще до полномасштабной разработки АС с привлечением большого круга программистов, системных администраторов и других высококвалифицированных специалистов. Принципы работы автоматического транслятора функционально-реляционной модели в интерфейс взаимодействия с конечным пользователем АРМ АС представлены в виде правил ППИ.

5. Принятие окончательного решения в отношении выбора определенного варианта автоматизации обследуемого объекта или, в случае необходимости, полный или выборочный повтор предыдущих шагов предлагаемой методологии.
6. Реализация утвержденного решения, а именно, генерация программного обеспечения автоматизированных рабочих мест, доработка такого программного обеспечения с привлечением необходимого количества алгоритмистов и программистов.

Заключение

Представленные решения FRT-методологии отчасти устраняют недостатки реляционного подхода и методологии IDEF0, следовательно, их дальнейшее развитие является целесообразным. При этом заслуживают внимания следующие направления исследования.

1. Дальнейшая формализация функционально-реляционной модели и сведение её конструкций к хорошо известным формальным системам.
2. Расширение множества правил ППИ функционально-реляционной модели и их формализация.
3. Систематизация процесса анализа объекта автоматизации с точки зрения оптимизации информационных и материальных потоков, а также структуры проектируемой АС, разработка новых и формализация имеющихся критериев оценки для осуществления такого анализа.
4. Развитие существующих и разработка новых формальных методов технико-экономического обоснования проектов по автоматизации объектов обследования.
5. Развитие существующих и поиск новых методов и моделей физической организации, и обработки данных, представленных функционально-реляционной моделью.

Литература

1. РД IDEF0-2000. Методология функционального моделирования IDEF0. Госстандарт России. – М., 2000.
2. Integration Definition for Function Modeling (IDEF0). Draft Federal Information Processing Standards Publication 183, 1993.
3. Мейер Д. Теория реляционных баз данных: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 608 с.
4. Codd E.F. A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks. CACM 13, No. 6 (June 1970). Republished in Milestones of Research – Selected Papers 1958-1982 (CACM 25th Anniversary Issue), CACM 26, No. 1, 1983.
5. Ковтун И.И. Теория и практика проектирования информационных систем. Монография. – М.: МАБИУ, 2011. – 149 с.
6. Ковтун И.И. Принципиальные решения функционально-реляционной методологии проектирования автоматизированных систем // Журнал «Информатизация и связь». № 3, 2013. – С. 47-55.

Для заметок