ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«МНИТИ»

(*МОСКОВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ ИНСТИТУТ*)

ТЕХНИКА СРЕДСТВ СВЯЗИ

Серия: ТЕХНИКА ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Научно-технический сборник

Москва
2018 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.; д.т.н., проф. Назаров С.В.; д.т.н., с.н.с. Арзуманян Э.П.; 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», 2018. – 149 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», 2018 г.
Отпечатано в ЗАО «МНИТИ»

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие ……..... 4

Вилкова Н.Н., Быструшкин К.Н. Роль и место АРПАТ в проекте внедрения в России цифрового телевидения ……. 5

Кукк К.И. Спутники на передовых рубежах телевизионного вещания 16

Ковин С.Д., Сагдуллаев Ю.С., Попов А.В. Влияние сжатия чёрно-белых телевизионных изображений на их качество ……..……..... 26

Травина Е.И. Динамическая оценка визуального качества изображений …. 40

Арзуманян Э.П., Миколайчук Д.В. Исследование динамических характеристик телевизионной следящей системы ……. 52

Сагдуллаев Ю.С., Ковин С.Д. Модель интеллектуальной спектрозональной системы распознавания объектов …….. 62

Шавкунов О.В. Макет спектрозональной телевизионной камеры ……. 72

Сагдуллаев В. Ю. Преимущества использования системы многоракурсного телевидения ……..……..... 77

Толочков Д.В. Тепловизионная система кругового обзора для обнаружения высокоскоростных малоразмерных воздушных целей …….…… 87

Алимов А.Е., Шавкунов О.В. Двухспектральная интегрированная оптическая система для оптико-электронных средств наблюдения ……..…. 93

Салата Д.В., Ермошин К.Д. Разработка робота-манипулятора для анализа качества стабилизации изображений в оптико-электронных системах …..… 101

Сухачев А.Б. Оценка основных характеристик информационного обмена в современных авиационных комплексах мониторинга подстилающей поверхности ……..…….... 111

Смагин М.С. Этапы развития и современное состояние парка программных средств научно-технических организаций ……..... 125

Ковтун И.И. Функциональная методика оптимизации опытных производств ……..... 132

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.

ЗАО «МНИТИ» (Московский научно-исследовательский телевизионный институт), будучи одним из лидеров в сфере телевидения, ведёт 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 публикуется на Интернет-сайте ЗАО «МНИТИ», а также рассылается в печатном виде в министерства, ведомства, НИИ, ВУЗы и другие организации РФ (исследовательские центры, заводы, производственные объединения и т.д.), работающие в тематических направлениях, что позволяет учёным и разработчикам оперативно публиковать свои достижения, а читателям получать информацию из первоисточников.

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

Вилкова Н.Н., к.т.н.
Быструшкин К.Н., к.т.н., с.н.с.

РОЛЬ И МЕСТО АРПАТ В ПРОЕКТЕ ВНЕДРЕНИЯ В РОССИИ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

ЗАО «МНИТИ», как ведущая научно-исследовательская организация Минпромторга России по направлению «Цифровое телевидение», проводит исследования и готовит предложения по технической и промышленной политике Министерства в этой области техники. В рамках таких работ по инициативе Минпромторга России для объединения потенциала предприятий отрасли и защиты интересов отечественных производителей, под руководством института в 2008 году была создана Ассоциация разработчиков и производителей аппаратуры для телерадиовещания – АРПАТ. В ноябре этого года Ассоциации исполнилось 10 лет. Юбилей – это хороший повод подвести итоги и наметить планы дальнейших работ.

10 лет успеха

История Ассоциации разработчиков и производителей аппаратуры для телерадиовещания (АРПАТ) началась 18 ноября 2008 года, когда в рамках конгресса НАТ-2008 состоялось её Учредительное собрание (Рисунок 1). С инициативой создания Ассоциации выступили ЗАО «МНИТИ», ЗАО «Завод им. Козицкого», ООО НПП «Триада-ТВ», ФГУП НИИР, ОАО «Март» и ФГУП «НИИТ» (сегодня АО «НИИ Телевидения»). Кроме них в Учредительном собрании приняли участие Заместитель Министра промышленности и торговли Российской Федерации Юрий Иванович Борисов (сейчас заместитель председателя правительства Российской Федерации по вопросам оборонно-промышленного комплекса), Заместитель Министра связи Российской Федерации Дмитрий Станиславович Северов, Виталий Петрович Стыцько и профессор Марк Иосифович Кривошеев. Президентом АРПАТ был выбран генеральный директор ЗАО «МНИТИ» Надежда Николаевна Вилкова, а Председателем совета АРПАТ – Председатель совета директоров ЗАО «Завод им. Козицкого» Борис Викторович Иванов.

Рис. 1. Учредительное собрание АРПАТ 18 ноября 2008 года.

На Учредительном собрании отмечалось, что целью создания Ассоциации является разработка и проведение единой политики для защиты интересов российских производителей приёмо-передающей аппаратуры цифрового телевидения и радиовещания.

Поэтому основной задачей Ассоциации является содействие расширению масштабов промышленного производства телерадиовещательного оборудования и отечественной элементной базы, оптимизация использования производственных мощностей, создание рабочих мест, в том числе в сфере научно-технической деятельности.

31 октября 2018 года, в рамках проведения мероприятий по празднованию 10 летнего Юбилея АРПАТ, на выставке NATEXPO-2018 прошла конференция «АРПАТ – 10 лет успеха» (Рисунок 2), на которой были подведены итоги деятельности Ассоциации и рассмотрена её роль в проекте внедрения цифрового телевидения в России.

Рис. 2. Юбилейная конференция «АРПАТ -10 лет успеха».

В приветственном обращении было рассказано о роли и месте Ассоциации в проекте перехода российского телевидения на цифровой формат вещания. Директор Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга России Хохлов С.В. поздравил руководство и членов Ассоциации с этим юбилеем и вручил благодарственное письмо (Рисунок 3). В этом письме отмечены заслуги Ассоциации в развитии отечественной радиоэлектронной промышленности и создании аппаратуры для сетей цифрового телевидения. Генеральный директор Национальной ассоциации телерадиовещателей (НАТ) Широких А.А. также поздравил присутствующих с Юбилеем АРПАТ и вручил почётный диплом. Кроме того, было подписано соглашение о сотрудничестве между АРПАТ и НАТ.

Рис. 3. Вручение благодарственного письма Минпромторга России и подписание соглашения с НАТ.

В ходе конференции её участники единодушно отметили большую роль АРПАТ в консолидации российской промышленности и создании научно-технической и производственной кооперации отечественных разработчиков и производителей аппаратуры для цифрового телевидения.

31 октября 2018 года на церемонии награждения победителей конкурса Шестой премии имени Владимира Зворыкина, в рамках XXII Международного конгресса НАТ, Президенту АРПАТ был вручён специальный приз в номинации «За создание и/или усовершенствование оборудования/технологии в области телерадиопроизводства» за «Разработку и освоение конкурентоспособных образцов российской аппаратуры для перехода на цифровое телевидение, в том числе передатчиков DVB-T2» (Рисунок 4).

Рис. 4. Специальный приз Премии Владимира Зворыкина.

Столь высокая оценка деятельности АРПАТ является признанием заслуг Ассоциации в реализации федеральной целевой программы (ФЦП) перевода российского телевидения на цифровой формат вещания (ФЦП «Развитие телевизионного вещания в Российской Федерации на 2009-2018 годы»). В наибольшей степени успех реализации этого проекта создания сети из 2-х цифровых мультиплексов DVB-T2 на просторах России принадлежит ФГУП РТРС, которое было ответственным исполнителем работ по ФЦП. Однако нельзя не отметить, что в значительной степени он обусловлен также активным участием в нем отечественной промышленности, сумевшей в короткие сроки разработать и организовать серийное производство оборудования для цифрового телевидения стандарта DVB-T, а затем (с 2012 года) и DVB-T2.

Согласно данным ФГУП РТРС свыше 80 % аппаратуры первого цифрового мультиплекса произведено в России. Это особенно важно сегодня, когда остро

стоит проблема импортозамещения, в том числе в секторе гражданской продукции. Но для того, чтобы эти достижения стали реальностью, российским предприятиям пришлось отчаянно бороться и победить в конкурентной борьбе с ведущими мировыми компаниями.

Все участники рынка понимали, что переход российского телевидения на «цифру» формирует большой рынок абонентского и профессионального телевизионного оборудования нового поколения с оборотом в сотни млрд. руб. Потенциальный объём оборудования в виде цифровых приставок к аналоговым телевизорам и цифровых телевизоров оценивался тогда в 375 млрд. руб., а затраты на развёртывание сетей цифрового вещания – в 125 млрд. руб. При этом в ФЦП декларировалось, что «создание материально-технической базы для цифрового телевидения и радиовещания должно происходить при активном участии российских изготовителей».

Однако глобализация экономики уже в те годы резко обострила конкуренцию на рынке телевизионной аппаратуры, в результате чего отечественные производители испытывали нарастающее ценовое давление на рынок со стороны импортной продукции. Благодаря этому чётко обозначилась негативная тенденция ориентации российского рынка на импортное абонентское оборудование, что объективно привело к постепенному вытеснению отечественных производителей с внутреннего российского рынка теле- и радиоаппаратуры. Поэтому первоочередной задачей АРПАТ стала защита отечественных производителей и обеспечение их активного участия в реализации ФЦП. Первым важным успехом АРПАТ стало соглашение с Минкомсвязи России и ФГУП РТРС о приоритетном использовании в сетях цифрового вещания России оборудования российского производства. При этом нужно отметить конструктивную позицию и личное участие в подготовке и реализации этого соглашения заместителя Министра Минкомсвязи России Алексея Весьмировича Малинина и Заместителя директора ФГУП РТРС Виктора Николаевича Пинчука. Во многом благодаря им это соглашение действительно выполнялось.

Результат не заставил себя ждать и уже 26 января 2011 года на заседании Совета Федерации Министр связи и массовых коммуникаций РФ Игорь Олегович Щёголев отметил, что в программу вовлечено 45 производителей оборудования и 62 строительно-монтажные компании от Санкт-Петербурга до

Камчатки. Доля российского оборудования составляет 88 % и оно дешевле зарубежных аналогов. Разница – от 15 до 40 процентов. При этом его технические характеристики по энергосбережению, надёжности и массогабаритным показателям аналогичны, а по ремонтопригодности превышают зарубежные аналоги. Доля российских производителей телеприёмников – свыше 85 % объёма рынка.

Этот успех привёл к быстрому росту авторитета АРПАТ и, как следствие, количества её членов. Уже в 2011 году Ассоциация на принципах частно-государственного партнерства объединяла уже 14 предприятий из четырёх федеральных округов страны: Северо-Западного, Центрального, Сибирского и Южного. В их числе: ОАО «Март», ЗАО «Завод им. Козицкого», ОАО «РИМР» и ФГУП «НИИТ» из Санкт-Петербурга, московские ЗАО «МНИТИ» и ФГУП «НИИР», сибирские ФГУП «Омское производственное объединение «Иртыш»», ФГУП «ОНИИП» и ООО НПП «Триада-ТВ», а также ОАО «Ставропольский радиозавод «Сигнал»». Впоследствии к АРПАТ также присоединились ООО «Самсунг Электроникс Рус (Калуга), ООО «Долби Си-Ай-Эс», ООО «ТиПиВи» (TPV), ЗАО «Элекард девайсез», дочернее предприятие GS Group и другие. Общее число членов Ассоциации достигло 26, они представляют ведущих разработчиков и производителей абонентского и профессионального телевизионного оборудования, а также научно-исследовательские институты отрасли (Рисунок 5).

География предприятий и организаций АРПАТ охватывает практически все регионы страны, направления их деятельности включают все виды работ по тематике цифрового телерадиовещания, начиная с разработки системных проектов и заканчивая выпуском аппаратуры, обеспечивающей передачу телевизионного сигнала в эфир и его доведение потребителю.

Рис. 5. Члены АРПАТ.

По мере реализации ФЦП ряд предприятий Ассоциации переходил на выпуск других типов продукции. Например, один из ведущих производителей цифровых приставок в России ОАО «Ставропольский радиозавод «Сигнал»» прекратил их выпуск в связи с резким увеличением объёмов работ по оборонному заказу. Тем не менее, благодаря усилиям аппарата Ассоциации и её Президента, АРПАТ и сегодня остаётся дееспособной и уважаемой промышленной ассоциацией в России.

На настоящий момент в АРПАТ входят 15 ведущих научно-исследовательских организаций и производственных предприятий радио-электронной отрасли, обеспечивающих выполнение большинства научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области цифрового телерадиовещания в России.

Ассоциация активно участвует во внедрении современных информационных систем и телекоммуникационного оборудования, включая строительство сетей цифрового телерадиовещания. Участвующие в этих проектах предприятия АРПАТ существенно расширили номенклатуру и объёмы производства телерадиовещательного оборудования.

На сегодняшний день Ассоциация, благодаря высокому научно-техническому и производственному потенциалу её членов, успешно выполняет роль отраслевого центра компетенций в области цифрового телевидения и телекоммуникаций. Аналитическая группа АРПАТ осуществляет постоянный мониторинг СМИ и других информационных ресурсов в Интернет, результаты анализа которых еженедельно рассылаются членам Ассоциации. Эти аналитические отчёты неизменно получают высокие оценки у её членов и используются специалистами ЗАО «МНИТИ» и его межотраслевого научно-технического совета по цифровому телерадиовещанию (НТС ЦТ) при подготовке предложений для Минпромторга России и других организаций по проведению научно-технической и промышленной политики в России.

Перезагрузка. Впереди – новые горизонты

Главным направлением деятельности АРПАТ в годы реализации ФЦП была консолидация технической политики её членов и защита отечественного производителя. Несмотря на собственные коммерческие интересы, члены АРПАТ наладили эффективное научно-техническое сотрудничество. Например, производители цифровых передатчиков разработали и внедрили унифицированный программный интерфейс для дистанционной диагностики и настройки передатчиков, защищённый от хакерских атак и другого несанкционированного воздействия. Это позволило резко повысить потребительские и эксплуатационные характеристики отечественных передатчиков, что стало одним из весомых конкурентных преимуществ. Члены АРПАТ принимали активное участие в опытных зонах цифрового телевидения в 2010-2015 годах, в том числе в городе Тверь, в которых в условиях реального приёма отрабатывалась приёмная и передающая аппаратура DVB-T и DVB-T2. Под руководством ЗАО «МНИТИ» проводились совместные научные исследования и разработки по перспективным направлениям телевизионной техники. Так, ЗАО «МНИТИ, ЗАО «Элекард Девайсез» и ООО «Триаксесс вижн» была разработана технология создания совместимой системы

стереоскопического цифрового телевидения 2D/3D DVB-T/T2. Были изготовлены комплекты приёмного и передающего оборудования, которые позволили провести в Москве в мае 2011 года первую в мире передачу по каналу эфирного цифрового телевидения программ стереоскопического телевидения с телебашни компании ООО «Октод». Эта российская разработка получила высокую оценку на международных научно-технических салонах. В частности, она была отмечена серебряной медалью на 63-ей Международной выставке «Идеи - изобретения - Новые продукты» IENA-2011 (г. Нюрнберг, Германия), а также золотой медалью имени Николы Тесла Международной ассоциации изобретателей.

Таким образом, благодаря членам АРПАТ отечественная промышленность и отраслевая наука обладают необходимым научно-техническим потенциалом, который позволяет осуществлять полный цикл разработки и производства современной цифровой телевизионной техники DVB-T2.

Рис. 6. Совместная экспозиция ЗАО «МНИТИ»/АРПАТ
на выставке «НАТ Экспо 2018».

АРПАТ принимает самое активное участие в подготовке и обсуждении проектов документов о поддержке российских производителей. Представители Ассоциации являются членами практически всех координационных советов при Минпромторге России и других ведомств и поэтому могут отстаивать интересы отечественных организаций на ранних стадиях подготовки документов.

Одним из наиболее значимых результатов работы АРПАТ по стимулированию производства телевизоров в России стало участие в подготовке приказа Минпромторга России № 335 от 18 ноября 2008 года «Об организации в Минпромторге России работы по подтверждению целевого назначения ввозимых плазменных модулей (экранов) и устройств на жидких кристаллах». В соответствии с этим приказом, российские производители телевизоров освобождались от уплаты ввозной таможенной пошлины на плазменные и ЖК панели в 15 %, что обеспечивало им существенные преференции по сравнению с компаниями-импортёрами готовых телевизоров, на которые действует ставка ввозной таможенной пошлины в 15 %. Временная отмена ввозных таможенных пошлин была введена с целью стимулирования развития производства телевизоров в России и предусматривала поэтапное увеличение степени локализации этого производства.

Проведённый анализ показал высокую эффективность отмены ввозной таможенной пошлины, так как его результатом явилось построение современных телевизионных заводов в России ведущими мировыми производителями телевизоров: Samsung, LG и TPV. Сегодня эти заводы производят свыше 80 % продаваемых в России телевизоров, осуществляется поэтапное повышение локализации их производства, происходит трансфер технологий и созданы тысячи высококвалифицированных рабочих мест.

Члены АРПАТ совместно с НТС ЦТ при ЗАО «МНИТИ» проводят активную политику по поиску зарубежных партнёров для осуществления взаимовыгодных проектов. В частности, летом прошлого года ЗАО «МНИТИ» и ООО «НПП «Триада ТВ» провели переговоры в Китае, результатом которых стала поставка опытного образца цифрового передатчика, который проходит испытания на сети цифрового вещания в Шанхае.

Рис. 7. Цифровые телевизоры производства членов АРПАТ.

Сегодня, когда ФЦП практически завершена, требуется «перезагрузка» АРПАТ под новые цели и задачи. И такая работа активно ведётся. Своё второе десятилетние АРПАТ встречает в расцвете сил и со множеством творческих планов.

Литература

1. Быструшкин К.Н. АРПАТ – как много в этом слове // Телеспутник, № 9. – СПб., 2018. – С. 36-39.

УДК 621.397: 629.78

Кукк К.И., д.т.н., проф.

СПУТНИКИ НА ПЕРЕДОВЫХ РУБЕЖАХ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ

В работе приведён хронологический обзор спутникового телевидения. Детально рассмотрены основные этапы развития соответствующих стандартов и даны их сравнительные характеристики, а также затрагиваются различные проблемы формирования и передачи спутникового сигнала, что позволяет получить представление о динамике развития спутникового телевещания в современном мире.

21 мая 1974 года на Дипломатической конференции в Брюсселе была принята «Конвенция о распространении несущих программы сигналов, передаваемых через спутники». В соответствии с этой конвенцией государства должны предотвращать несанкционированное распространение программ без разрешения вещательной организации. Однако, положения конвенции не применяются, когда распространение сигнала производится со спутников непосредственного вещания независимо от их принадлежности, но без права дальнейшего распределения принятых сигналов. Конвенция была ратифицирована Указом Президиума Верховного Совета СССР от 12 августа 1988 года.

Как раз, в это время разворачивались работы по разработке систем спутникового непосредственного телевизионного вещания (СНТВ).

Несмотря на то, что первым прообразом системы спутникового непосредственного телевизионного вещания была разработанная ещё в 1976 году система «Экран», в Советском Союзе до 1989 года индивидуальный приём телевизионных сигналов со спутников был запрещён. О спутниковом непосредственном телевизионном приёме индивидуальными зрителями не рекомендовалось даже упоминать в печати. Тем не менее, около западных границ страны сигналы от европейских спутников типа Евтелсат-I-FI (13^{o} в.д.) и Евтелсат-I-F2 (10^{o} в.д.), осуществлявших передачу программ непосредственного телевизионного вещания с середины 80-х годов XX века, хорошо принимались на самодельные антенны (тарелки) умельцев, и многие жители западных районов СССР имели доступ к иностранным телевизионным передачам. В качестве суррогатов зеркал параболических антенн

использовались тазы, детские зимние каталки и т.п. В следствие этого специалисты стали думать о создании в СССР аналогичной системы, хотя бы в качестве ответного пропагандистского оружия. Да и технология СНТВ сама по себе была очень привлекательна и перспективна.

И тогда в 1989 году по инициативе Министерства промышленности средств связи и Министерства общего машиностроения было подготовлено постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР, которое отменяло действующие запреты на СНТВ и предусматривало развитие в Советском Союзе этого направления космической техники.

После выхода разрешающего Постановления на предприятиях Минпромсвязи и Минсвязи началась разработка и изготовление спутников СНТВ и станций передачи программ на спутники, а также серийный выпуск абонентских приёмных станций.

НИИ Радио была поручена разработка ретрансляторов «Дракон» для спутников непосредственного телевизионного вещания «Галс» в диапазоне 17/12 ГГц. Спутник «Галс-11» был запущен на орбиту в январе 1994 года, а спутник «Галс-12» – в ноябре 1995 года. В 1996 году были развернуты работы по созданию 16-ствольного ретранслятора для космического аппарата «Галс-16», но из-за финансовых трудностей работы были прекращены [1].

С середины 90-х годов XX века в мире началось экстенсивное развитие спутникового непосредственного вещания. Росло число ретрансляторов на спутниках и увеличивалось количество спутников, осуществляющих телевизионное вещание. Первая полноценная европейская коммерческая спутниковая платформа непосредственного телевидения с использованием спутника Astra 1A была создана люксембургской компанией SES в 1989 году, и называлась Sky Television PLC (ныне BSkyB). В США наибольших успехов достигли компании DirecTV и Dish Network. В России, в сентябре 1996 года, непосредственное вещание начала компания «НТВ-плюс».

В 2016 году в мире насчитывалось примерно 41600 телевизионных каналов непосредственного спутникового вещания. Ожидается, что до 2026 года число таких каналов возрастёт ещё не менее, чем на 12000.

Объём рынка космической отрасли в 2016 году составил около 335 млрд. долл. США. Самый крупный сегмент занимает спутниковое телевидение с долей 29 % (96 млрд. долл. США). Среди телекоммуникационных услуг доля доходов, приходящаяся на Радиовещательную спутниковую службу, в которой в основном осуществляется непосредственное телевизионное вещание, превышает 80 %.

Несмотря на жёсткое конкурентное давление со стороны наземных систем и линий связи, спутниковое телевидение непрерывно продолжает развиваться, благодаря использованию своих специфических качеств, заполняя наиболее благоприятные для неё ниши по предоставлению телевизионных услуг.

Но главная особенность спутниковых систем заключается в том, что СНТВ не только идёт в ногу с общим развитием телевидения, но и является первопроходцем всех новых технологий, опережая, особенно на первом этапе, эфирное, кабельное и интернет-телевидение. Системы непосредственного спутникового телевизионного вещания и спутниковые системы распределения телевизионных программ являются тем полигоном, на котором практически оцениваются все достоинства и недостатки новых телевизионных стандартов.

Практически любое новшество, связанное с качеством передаваемого изображения или звука, влечёт за собой необходимость расширения передаваемой полосы частот. Поскольку частотный ресурс ограничен и строго поделён между службами действующим Регламентом радиосвязи, то для внедрения новых технологий разработаны и разрабатываются более совершенные методы компрессии изображения и звука, а также экономичные методы модуляции, кодирования и уплотнения сигналов. Кроме того, реализуется возможность перехода для передачи телевизионного вещания со спутников в более высокие диапазоны частот.

Со времени начала вещания в цифровом формате методы компрессии изображений систематически совершенствуются: H.262/MPEG-2 (1995-2000 годы), H.264/MPEG-4 (AVC) (1998-2004 годы), H.265 или HEVC (англ. High Efficiency Video Coding – высокоэффективное кодирование видеоизображений) (2013 год), H.266 (~ 2020-2021 годы). Каждый новый стандарт сжатия сокращал необходимую скорость передачи телевизионного сигнала примерно в полтора-два раза (Таблица 1).

Таблица 1.

Стандарт видеокодирования	**Среднее сокращение битрейта**			
	H.264/MPEG-4 AVC HP	MPEG-4 ASP	H-263 HLP	H.262/MPEG-2 MP
HEVC MP	35,4 %	63,7 %	65,1 %	70,8 %
H.264/MPEG-4 AVC HP		44,5%	46,6%	55,4%
MPEG-4 ASP			3,9 %	19,7 %
H-263 HLP				16,2 %

В действующих системах непосредственного вещания почти достигнуты практические пределы по излучаемой бортовыми ретрансляторами мощности, а также по полосам частот. Отстоящими от теоретических и практических пределов остаются характеристики сигнально-кодовых конструкций и методы кодирования.

Современные системы связи и цифрового вещания, основанные на использования глубокой компрессии сигналов, требуют передачи сигналов с очень высокой надёжностью кодовой защиты. Повышенная надёжность может быть достигнута за счёт каскадного кодирования. Каскадное кодирование предусматривает последовательное включение двух или более кодеков, каждый из которых предназначен для исправления ошибок различной структуры.

В своё время для систем непосредственного спутникового вещания был разработан стандарт DVB-S, который не предъявлял высоких требований к использованию энергетического и частотного ресурса ретрансляторов спутника. По этому стандарту основным методом модуляции является квадратурная фазовая модуляция (англ.: QPSK). В качестве методов кодирования использовались алгоритмы Рида-Соломона и Витерби.

Использование модуляции QPSK требует меньше начальных капиталовложений, он широко используется во всём мире. И это является его основным преимуществом. Однако по мере увеличения потребности в пропускной способности бортовых ретрансляторов это становится тормозом развития спутникового цифрового телевизионного вещания и требует привлечения новых бортовых ресурсов, что приводит к увеличению эксплуатационных расходов из-за необходимости дополнительной аренды спутниковых стволов.

На рисунке 1 приведена зависимость пропускной способности от полосы частот для различных значений скоростей передачи для стандарта DVB-S и при использовании модуляции QPSK.

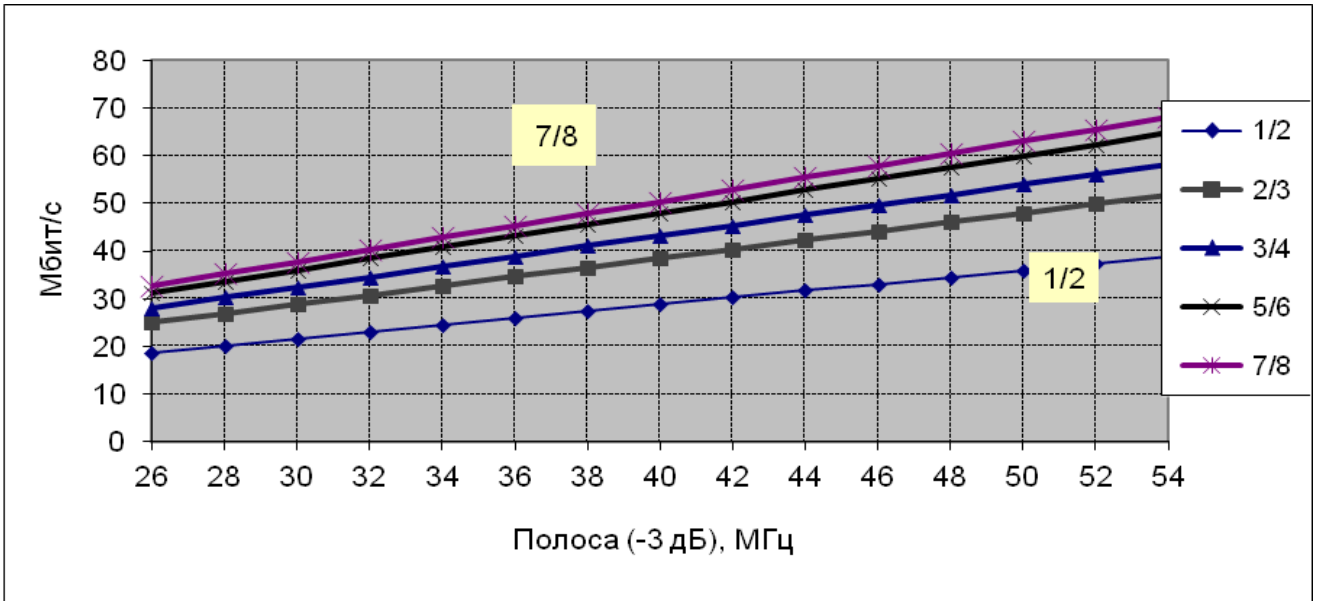


Рис. 1. Зависимость пропускной способности от полосы частот для различных значений скоростей передачи.

В результате теоретического анализа и экспериментальных работ, более эффективной была признана система спутникового вещания с турбокодами. Благодаря использованию турбокодов, становится возможным использовать такие многопозиционные методы модуляции как 8PSK и 16QAM. В начале 2002 года был подготовлен стандарт DVB-S2. Новый стандарт по сравнению со стандартом DVB-S способствовал увеличению пропускной способности более чем на 30 % и на два порядка по помехоустойчивости относительно QEF (англ.: Quasi Error Free – точка квазиошибочного приёма).

В 2014 году утверждён новый стандарт DVB-S2X, позволяющий на 30-50 % эффективней использовать частотный спектр по сравнению со стандартом DVB-S2. Сравнительные характеристики этих двух стандартов приведены на рисунке 2 [2].

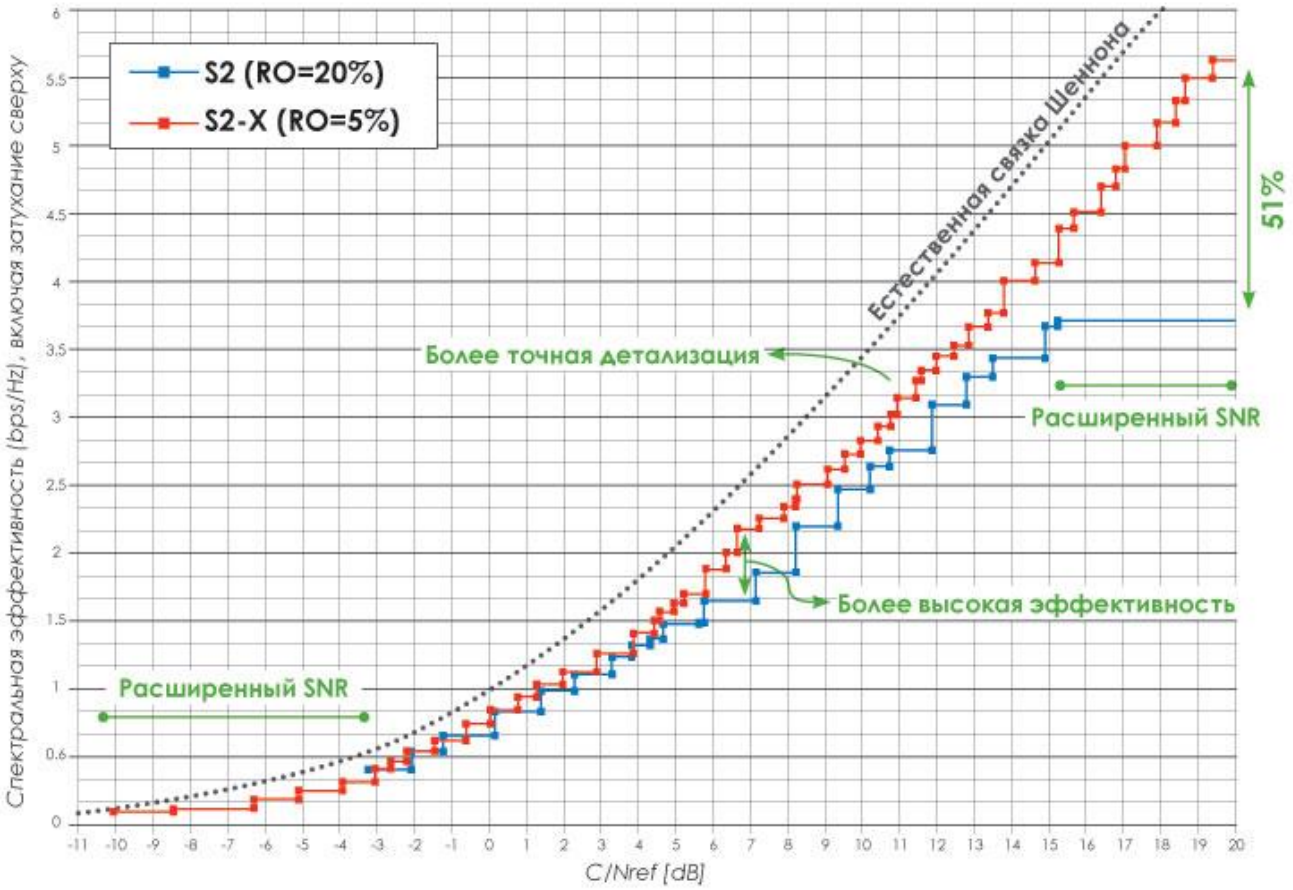


Рис. 2. Сравнительные характеристики стандартов DVB-S2 и DVB-S2X.

Определённый выигрыш в пропускной способности ретранслятора можно получить за счёт статистического мультиплексирования с обратной связью между мультиплексорами и кодерами. Технология предусматривает перераспределение транспортной полосы между различными телевизионными каналами в зависимости от сложности передаваемого видео. Классическая кривая эффективности мультиплексирования телевизионных каналов приведена на рисунке 3. При малом числе программ, передаваемых через один ретранслятор эффективность метода невелика.

Начиная с середины 90-х годов XX века, рассматривается перспектива передачи через спутниковые ретрансляторы телевидения высокой чёткости (ТВЧ). Начало вещания ТВЧ-программ в США приходится на 2005 год. К 2011 году передача ТВЧ стала для спутников обычной нормой [3].

У таких гигантов СНТВ, как SES и Eutelsat, доля передаваемых ТВЧ-каналов составляет более 30 % и около 19 % соответственно. В среднем по миру эта доля в 2016 году составляла немногим более 16 %.

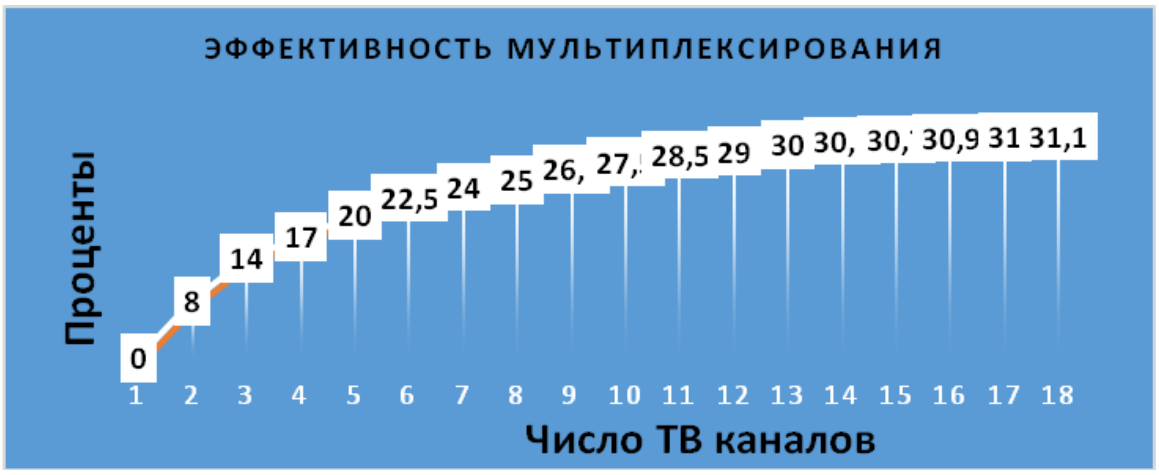


Рис. 3. Эффективность статистического мультиплексирования.

Кажущаяся техническая легкость перехода на передачу ТВЧ по спутниковым каналам наталкивается на экономическую нецелесообразность отказа от передачи программ стандартного качества в ограниченных выделенных и освоенных диапазонах частот. Эти обстоятельства привели специалистов к следующим прогнозным выводам: в 2026 году мировая доля спутниковых каналов ТВЧ составит 25 % или немногим больше.

С началом внедрения в телевидение режима ультравысокой чёткости (англ.: UHDTV) с разрешением 4K (2160p) и 8K (4320p) крупнейшие операторы СНТВ приступили к тестовым передачам.

12 сентября 2008 года во время ежегодной международной выставки IBC компания NHK (Япония), RAI (Италия), BSkyB и др. продемонстрировали первую в истории публичную прямую ретрансляцию 4K из Турина через спутник Atlantic Bird 3 (Eutelsat 5 West A), расположенным в подспутниковой точке 5º з.д., до места проведения конференции в Амстердаме. На спутнике использовалось два ретранслятора мощностью 94 Вт с полосой 36 МГц, работавших по стандарту DVB-S2 и модуляцией 8PSK 5/6. Суммарная скорость 140 Мбит/с делилась между двумя ретрансляторами, образующих два транспортных потока.

Сегодня уже, наверное, нет в мире оператора спутниковой связи, который бы не организовал тестовые передачи в 4K через свою систему. В таблице 2 приведены данные некоторых мероприятий по передаче телевизионного сигнала с разрешением 4K, в том числе, проведенных в России.

Таблица 2.

Дата	Событие
19 апреля 2013	Фирмой SES была запущена трансляция со спутника «Астра» (19,2 в.д.).
27 июня 2013	Компания НСК («Триколор-ТВ») впервые в России осуществила публичную спутниковую телевизионную трансляцию UHDTV через 34 ретранслятор спутник «Eutelsat 36A». Скорость 40 Мбит/с.
7 февраля 2014	Телекомпания «НТВ-Плюс» осуществила тестовую UHDTV трансляцию церемонии открытия Олимпийских игр в Сочи через спутник «Eutelsat 36A».
Июнь 2014	ФГУП ГПКС и компания "ИСТАР" организовали передачу UHDTV в диапазоне 30/20 ГГц через спутник "Экспресс-АМ5".
22 октября 2014	Компания НСК («Триколор-ТВ») запустила первый в России телеканал в формате UHDTV.
Февраль 2016	ОАО "Газпром космические системы" совместно "NEC - Нева Коммуникационные Системы" провело испытания по передаче UHDTV через спутник "Ямал-401".

Компания SES во время ежегодной конференции SES Industry Days, проходившей в Люксембурге 23 и 24 мая 2018 года, впервые продемонстрировала трансляцию с разрешением 8К через спутниковую систему связи. Передача осуществлялась со скоростью 80 Мбит/с через один ретранслятор с полосой 36 МГц спутника Astra 3B (23,5° в.д.). Трансляция проводилась с использованием стандарта передачи DVB-S2X. Сжатие сигнала осуществлялось с помощью кодеров HEVC/H.365, поставленных немецкой компанией Spin Digital GmbH. В качестве приёмников использовались японские и тайваньские 8К-телевизоры фирм Sharp и United Microelectronics Corp.

Таким образом, была подтверждена принципиальная готовность спутниковых систем к передаче 8К.

Это подтвердила и компания Intelsat, которая во время проведения чемпионата мира по футболу 2018 года в России осуществила трансляцию игр в режиме 8К через спутник Intelsat 14, расположенный на орбитальной позиции 45° з.д. Сигнал на спутник подавался из телепорта города Атланта (штат Джорджия, США). В свою очередь сигнал из Москвы со скоростью 200 Мбит/с передавался в Атланту по наземным линиям (Москва – Токио – Нью-Йорк – Атланта). В телепорту сигнал компрессировался и через модулятор DVB-S2

поднимался на спутник. Приёмник с разрешающей способностью 8К для общего рассмотрения располагался в «Музее завтрашнего дня» в Рио-де-Жанейро.

Японская вещательная компания NHK в настоящее время проводит широкие тестовые испытания по передаче программ в режиме 8К в различных средах распространения сигнала (эфир, кабель, спутник, Интернет). Большие надежды возлагаются на спутниковые системы связи. Компания намерена организовать регулярную спутниковую трансляцию с разрешением 8К с 1 декабря 2018 года.

Крупнейший японский спутниковый оператор SKY Perfect JSAT, владелец 18 действующих геостационарных космических аппаратов, планирует использовать спутники для трансляции в формате 8К спортивные передачи с токийской летней Олимпиады-2020. Компания ориентируется на новый спутник двойного назначения DSN-1/Superbird-8 (Superbird-B3), который был выведен в точку стояния 162° в. д. в апреле 2018 года.

Сейчас, когда процесс становления спутникового вещания UHDTV на регулярной основе только формируется, практически невозможно привести достоверную количественную оценку числа каналов. Тем не менее, по некоторым прогнозам в 2026 году общее число спутниковых UHDTV-каналов составит от 1,5 % до 1,9 % от общего числа телевизионных каналов.

Также одной из проблемных задач, над которой уже многие годы бьются инженеры, является передача с помощью спутников в одном пакете телевизионных программ и широкополосный доступ в Интернет (ШПД). Для операторов СНТВ это некоторое увеличение ARPU (англ.: Average revenue per user – средняя выручка с одного пользователя), а для абонентов – просто удобнее.

При передаче телевизионного сигнала обычно применяется широковещательная рассылка информации (англ.: broadcast), а передача ШПД – это одноадресная рассылка информации (англ.: unicast). Это принципиальное различие определило своеобразность современных технологии построения систем телевизионного вещания и систем предоставления услуг ШПД. Более того, от типа предоставляемых услуг зависит и устройство космического аппарата.

До настоящего времени все предложения или попытки реализации передачи в одном пакете телевидения плюс ШПД, отвергались из-за отсутствия эффективности. Несмотря на скепсис ряда специалистов, работы в этом направлении продолжаются. В США этими вопросами занимается компания Echostar, в Европе – Skylogic (Италия) и Sky (TV) под брендом Tooway. Перспективное освоение диапазона частот 30/20 ГГц для спутникового непосредственного вещания приведёт, как ожидается, к рождению новых идей.

Литература

1. Кукк К.И. Спутниковая связь: прошлое, настоящее, будущее. – М.: Горячая линия Телеком, 2015.
2. Скуратовский Б. DVB-S2X – все, что вам надо знать о новом стандарте [Электронный ресурс]. URL: http://mediasat.info/2015/06/03/dvb-s2x/.
3. Воронин А.С., Кукк К.И. Спутниковое непосредственное телевещание в России и мире // Connect. Мир связи, № 12. – М., 2013.

УДК 004.932.2

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

ВЛИЯНИЕ СЖАТИЯ ЧЁРНО-БЕЛЫХ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ИХ КАЧЕСТВО

В статье рассмотрены особенности процесса сжатия чёрно-белых изображений, а также показаны методы и средства, используемые для оценки влияния такого сжатия на их качество. Кроме того, рассматриваются вопросы рациональности применения сжатия изображений с помощью различных алгоритмов, что позволяет учитывать их сравнительную эффективность при решении задач.

Введение

В настоящее время широкое применение в авиации находят различные виды систем телевидения, предназначенные для формирования, обработки и передачи видеоинформации. К примеру, передача видеоинформации, осуществляемая в процессе аэровидеосъёмки с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), работающих в режиме получения видеоинформации с места событий и ретранслирующих полученную видеоинформацию на наземные пункты управления (ПУ).

Для телевизионных (ТВ) систем авиационного применения, среди прочего, актуальной задачей является передача видеопотока с большим объёмом информации в реальном масштабе времени при ограничении на максимальное значение скорости её передачи. В качестве решения данной задачи часто предлагается рассматривать возможность снижения объёма передаваемой информации за счёт применения сжатия ТВ изображений.

Существуют различные методы кодирования [1], позволяющие выполнить сжатие ТВ изображения, среди которых наибольшей степени сжатия позволяют достичь методы кодирования с потерей качества. С повышением степени сжатия увеличивается количество потерянной видеоинформации и степень отличия сжатого изображения от оригинала. Выбор больших значений степени сжатия также отрицательно сказывается на субъективной оценке качества сжатого изображения.

Кроме потери информации, сжатие с потерями приводит к искажениям и появлению артефактов в изображении. При увеличении степени сжатия, уровень искажений и количество артефактов увеличивается. В процессе работы блочных алгоритмов сжатия изображений, которые используются, например, в известном стандарте сжатия *JPEG* искажения и артефакты в изображении, при объективной и субъективной оценке, выражены наиболее сильно и проявляются в виде блочности в пространственной структуре кадра.

Указанные эффекты, возникающие вследствие сжатия, оказывают неблагоприятное влияние на результаты дальнейшей обработки декодированных изображений, к примеру, алгоритмами поиска, распознавания и слежения за объектами. В связи с этим, даже если при субъективной оценке один и тот же объект из исходного и сжатого изображений воспринимается одинаково, то алгоритмы обработки могут воспринимать этот объект на исходном и сжатом изображениях как разные объекты.

Особенности влияния сжатия на качество чёрно-белых изображений

Положительной стороной использования высоких коэффициентов при сжатии является значительное уменьшение передаваемого объёма информации об изображении. Отрицательная сторона высокой степени сжатия ТВ изображений проявляется в потере большого количества деталей, из которых состоит объект. Таким образом, использование высокой степени сжатия ТВ изображений в значительной степени изменяет вид объектов, что приводит к невозможности осуществлять их автоматическое распознавание (или идентификацию) и сопровождение (или отслеживание).

Потеря большого количества деталей при больших степенях сжатия наиболее пагубно влияет на объекты, размеры которых значительно меньше размеров формата изображения и сопоставимы с размерами деталей, относящихся к текстуре фона. Данная особенность больших степеней сжатия демонстрируется на рисунке 1, где приведена одна и та же область из оригинального и сжатого изображения, содержащая объект сложной формы.

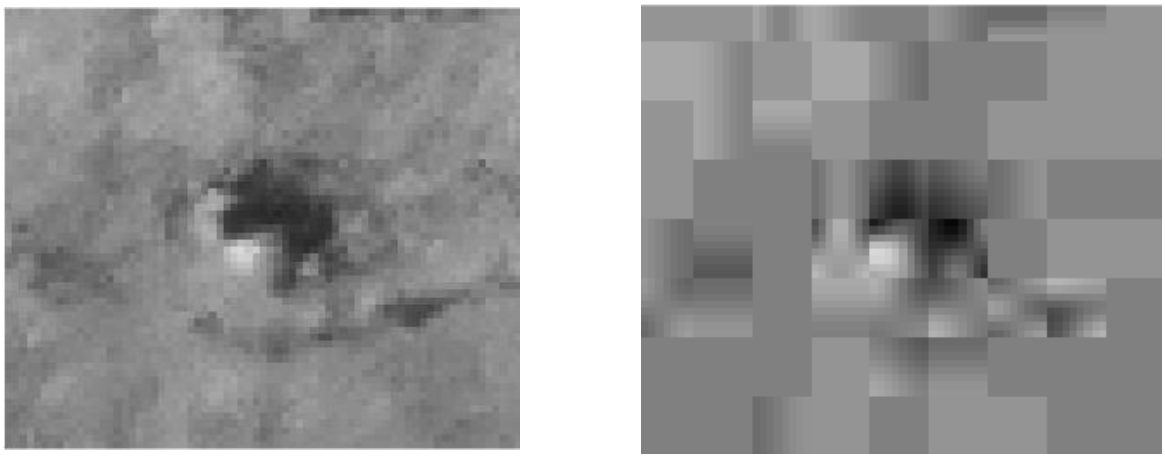


Рис. 1. Область с объектом сложной формы из оригинального изображения (слева) и сжатого изображения (справа).

Таким образом, чем меньше размер объекта на изображении (чем меньше пикселей используется для формирования данного объекта), тем при меньших степенях сжатия окажется невозможным осуществить его распознавание.

Однако, если объект простой формы имеет сравнительно большой размер (количество пикселей, описывающих объект соизмеримо с количеством пикселей, описывающих фон), на изображениях с высокими степенями сжатия, в некоторых случаях может наблюдаться эффект усиления контрастности фон – объект, что увеличивает вероятность распознавания объекта по контурам на общем фоне. Данный эффект вызван увеличением однородности фона и объекта из-за сокращения количества мелких деталей текстуры.

Выбор методов и средств, используемых для оценки влияния сжатия чёрно-белых изображений на их качество

Оценка влияния процесса сжатия по стандарту *JPEG* с различными степенями компрессии на качество чёрно-белых изображений проводилась на основе результатов расчёта коэффициента корреляции для сжатых изображений с их оригиналом, метрики оценки пикового отношения сигнал/шум (*PSNR*), и расчёта контрастности. Кроме этого, для оценки объёма данных, необходимого для хранения, оценивался размер файла сжатого изображения в зависимости от коэффициента сжатия. В качестве инструмента для реализации расчётов, согласно выбранным методам оценки влияния сжатия на качество изображений, использовался пакет для прикладного программирования *Matlab*.

Оценка коэффициента корреляции

Корреляция, и её частный случай для центрированных сигналов – ковариация, является методом анализа сигналов. Корреляция, согласно [7], представляет собой статистическую взаимосвязь случайных величин, либо величин, которые можно с некоторой допустимой степенью точности считать таковыми. Изменение значения величины, связанной корреляционной зависимостью с другой величиной, ведёт к изменению значения последней.

Таким образом, корреляционный анализ даёт возможность установить в цифровых сигналах наличие определённой связи изменения значений сигналов по независимой переменной. При этом возможны варианты, когда большие значения одного сигнала (относительно средних значений сигнала) связаны с большими значениями другого сигнала (положительная корреляция), или, наоборот, малые значения одного сигнала связаны с большими значениями другого (отрицательная корреляция), или данные двух сигналов не являются взаимосвязанными (нулевая корреляция). Функции корреляции сигналов применяются для интегральных количественных оценок формы сигналов и степени их сходства друг с другом [3].

Коэффициент корреляции или парный коэффициент корреляции в теории вероятностей и статистике – это математическая мера статистической взаимосвязи двух или более величин. Соответственно расчёт коэффициента корреляции позволяет получить объективную оценку степени связи между анализируемыми величинами.

При применении сказанного выше для решения задачи определения влияния сжатия на качество сжимаемых изображений, результат расчёта корреляции между оригиналом и сжатыми копиями изображения даёт некоторую оценку степени связи сжатого изображения с несжатым оригиналом, позволяя таким образом выяснить степень их отличия или сходства (связи).

Коэффициент корреляции, в зависимости от степени связи оцениваемых величин и направления этой связи, может принимать значения в диапазоне от –1 до 1. Если сравниваемые величины имеют прямую зависимость (прямое направление связи), т.е. увеличение значения одной величины приводит к увеличению значения другой величины, то коэффициент корреляции будет приобретать положительные значения [7]. В ином случае, когда речь идёт о противоположном направлении связи, коэффициент корреляции приобретает

значения со знаком минус. Чем ближе значение коэффициента к | 1 |, тем выше корреляция. Интерпретация численной оценки коэффициента корреляции оцениваемых величин, в зависимости от полученных значений коэффициента, представлена в таблице 1.

Таблица 1. Интерпретация численной оценки коэффициента корреляции.

Интерпретация	**Величина коэффициента корреляции**	
	Прямая (+)	*Обратная (–)*
Корреляция отсутствует	0	0
Очень слабая корреляция	до 0,2	до –0,2
Слабая корреляция	до 0,5	до –0,5
Средняя корреляция	до 0,7	до –0,7
Высокая корреляция	до 0,9	до –0,9
Очень высокая корреляция	свыше 0,9	меньше –0,9
Абсолютная корреляция	1,0	–1,0

Существуют различные виды коэффициентов корреляции, отличающиеся видом учитываемых входных данных, методикой расчёта силы статистической взаимосвязи между признаками и, соответственно, типом полученных результатов [4, 5] и др.

Для задачи оценки влияния сжатия на качество изображения, выбор вида коэффициента корреляции с соответствующей ему методикой расчёта зависит от вида шкалы осей, к которой относятся оцениваемые величины. В таблице 2 приведены типы шкал и некоторые из существующих видов коэффициентов корреляции [7], которые целесообразно применять в зависимости от типа шкалы.

Таблица 2. Типы шкал и соответствующие виды коэффициентов корреляции.

Типы шкал		**Вид коэффициента корреляции**
Переменная *X*	Переменная *Y*	
Интервальная (или отношений)	Интервальная (или отношений)	Коэффициент Пирсона
Ранговая, интервальная (или отношений)	Ранговая, интервальная (или отношений)	Коэффициент Спирмена
Ранговая	Ранговая	Коэффициент Кендалла
Дихотомическая	Дихотомическая	Коэффициент φ, четырёхполевая

Типы шкал		Вид коэффициента корреляции
Переменная *X*	Переменная *Y*	
		корреляция
Дихотомическая	Ранговая	Рангово-бисериальный коэффициент

В подавляющем большинстве, среди ставящихся задач по определению степени взаимосвязи, наиболее востребованными являются коэффициенты корреляции Пирсона, Кендалла и Спирмена. Учитывая, что оцениваемые величины (яркости пикселей исходного и сжатого изображений), отражающие степень влияния сжатия на качество изображения, определяются по шкале интервального типа, то для оценки влияния сжатия чёрно-белых изображений на их качество использовался коэффициент линейной корреляции Пирсона *r*. Данный коэффициент рассчитывается согласно формуле

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{m}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{m}(y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(x,y)}{\sqrt{s_x^2 s_y^2}}, \quad (1)$$

где x_i и y_i – значения переменных; m_x и m_y – средние значения переменных в выборке, s_x^2 и s_y^2 – дисперсии выборки.

В широком применении данный коэффициент в основном ограничен условием, при котором пара признаков x_i и y_i имеют нормальное, или приближенное к нормальному, совместное распределение. С позиции технической реализации обработки ТВ изображений, для которых выполняется расчёт коэффициента корреляции, они должны иметь одинаковый размер соотношения пикселей по вертикали и горизонтали.

Оценка пикового отношения сигнал/шум

Метрика оценки пикового отношения сигнал/шум (*PSNR*) является одной из самых популярных метрик для оценки качества цифровых изображений. Данная метрика показывает соотношение между максимумом возможного значения полезного сигнала и мощностью шума, искажающего сигнал. Обычно эту метрику используют для сравнения различных алгоритмов обработки, производительности различных методов сжатия или для изучения влияния различных параметров на эффективность того или иного алгоритма [7]. Формула для расчёта метрики *PSNR* в дБ приведена ниже.

$$PSNR = 10log_{10}\left(\frac{MAX_I^2}{MSE}\right) = 20log_{10}\left(\frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}}\right) = \\ = 20log_{10}(MAX_I) - 10log_{10}(MSE), \quad (2)$$

где *MAX* – максимальное значение уровня сигнала пикселя (для изображений с 8 градациями яркости *MAX*=255); *MSE* – среднеквадратическое отклонение, рассчитываемое по формуле, приведенной ниже.

$$MSE = \frac{1}{mn}\sum_{i=0}^{m-1}\sum_{j=0}^{n-1}[I(i,j) - K(i,j)]^2, \quad (3)$$

где *I* – исходное изображение без шума и искажений; *K* – копия исходного изображения с шумом или искажениями; *m*, *n* – размер изображений в пикселях по вертикали и горизонтали (количество строк и столбцов); *i*, *j* – координаты пикселя по оси абсцисс и ординат.

Метрика *PSNR* проста в реализации, она позволяет оценивать величины, лежащие в широком динамическом диапазоне за счёт логарифмического масштаба шкалы, а благодаря тому, что она часто используется в задачах оценки и анализа искажений в сжатых изображениях, известны достоверные пределы, в которых лежат её типичные значения. Среди недостатков метрики *PSNR* можно отметить то, что в некоторых случаях она может плохо учитывает воздействие смешанных видов шумов на пространственную структуру изображения и при наличии в изображении таких видов шумов, значение метрики, иногда, не отражает всех изменений, хотя качество изображения при этом может существенно изменяться [6].

Типовые значения *PSNR* для сжатых изображений обычно находятся в диапазоне от 30 дБ до 50 дБ для 8-битовых изображений и в диапазоне от 60 дБ до 80 дБ для 16-битных типов данных. Чем выше значение *PSNR*, тем меньше наблюдается уровень шума и искажений в сжатом изображении по сравнению с исходным изображением.

Оценка контрастности

Существует большое число методов, позволяющих оценить уровень контрастности изображения. В основе большинства таких методов, лежат различные виды оценок изменения уровня сигналов фона и объекта в реальной, либо в пространственно-частотной области изображения.

Для оценки влияния сжатия на качество изображений, выбрана оценка контрастности в реальной пространственной области изображения [2], которая имеет вид

$$K = \frac{B_О - B_Ф}{B_О}, \text{если } B_О > B_Ф;\ K = \frac{B_Ф - B_О}{B_Ф}, \text{если } B_Ф > B_О \qquad (4)$$

где K – коэффициент контрастности; $B_О$ и $B_Ф$ – значения яркости объекта и фона изображений соответственно.

Оценка объёма данных сжатых изображений

Объём данных, который требуется для хранения изображения до и после сжатия с различными степенями компрессии является одним из главных показателей эффективности работы систем компрессии. Оценка объёма данных используется при определении требуемого количества ресурсов канала связи или систем хранения информации для передачи или хранения этих изображений. В качестве оценки объёма данных, выбирался размер файла ТВ изображения, сжатого с различными степенями компрессии.

Исходные данные и результаты оценки влияния сжатия чёрно-белых изображений на их качество

В качестве исходных данных для оценки влияния сжатия на степень корреляции, контрастности, отношения сигнал/шум и объёма данных, были использованы полученные с борта БПЛА чёрно-белые ТВ изображения земного ландшафта с различными объектами и фоном.

Эти изображения представляют собой совокупность из трех 8-битных чёрно-белых изображений, имеющих формат 640×512 пикселей. Размер файла, каждого из исходных (несжатых) изображений, составляет 331 кбайт. Сжатие исходных изображений производилось согласно стандарту *JPEG* с коэффициентами сжатия 8, 16, 21, 36 и 56.

В каждом исходном изображении была выбрана область анализа, которая включает в себя объект или его часть и фон. Исходные изображения с указанными на них границами областей анализа приведены на рисунках 2-4.

Рис. 2. Изображение № 1

Рис. 3. Изображение № 2

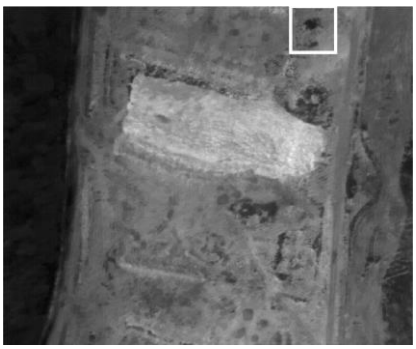


Рис. 4. Изображение № 3

Результаты проведенной оценки влияния сжатия на качество чёрно-белых изображений представлены на рисунках 5–10.

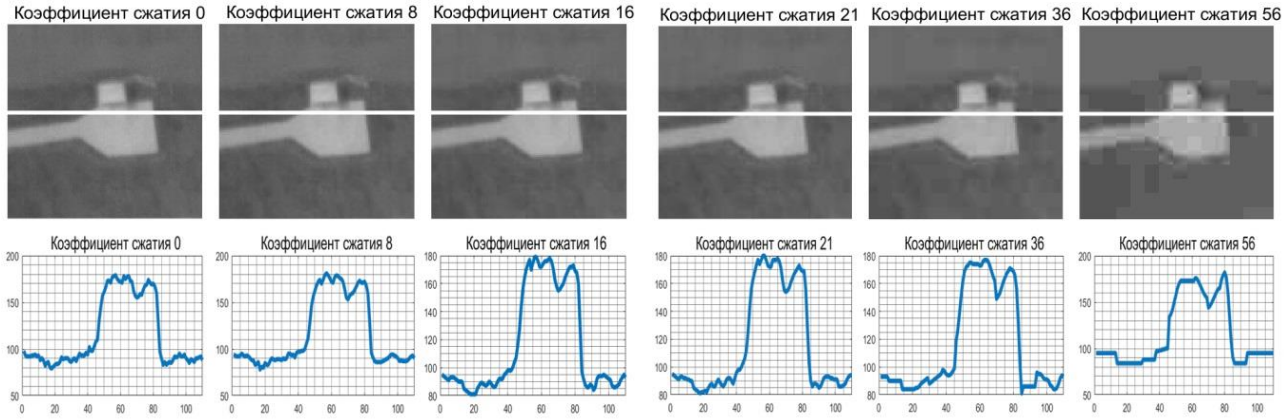
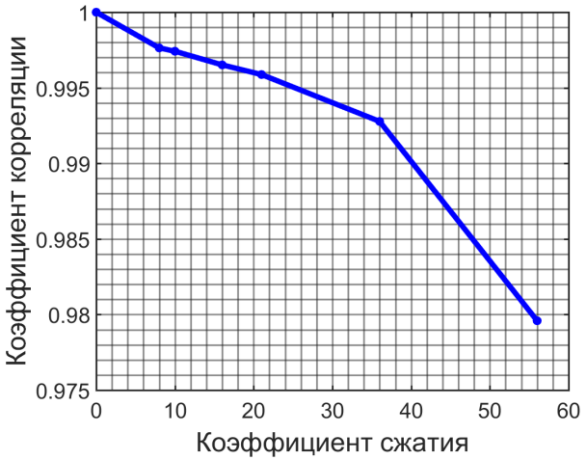
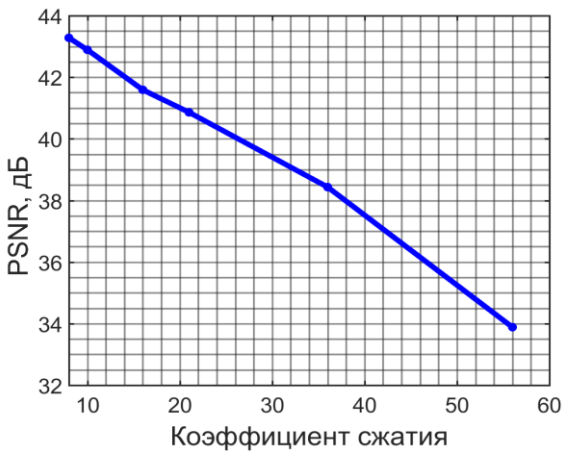


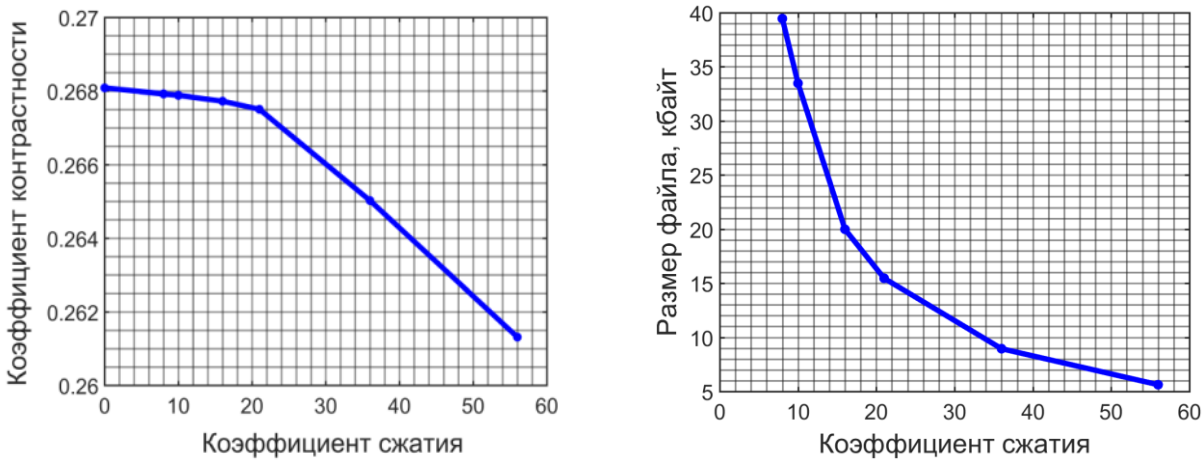
Рис. 5. Область анализа из изображения № 1 с разными степенями сжатия (сверху) и сигналы значений пикселей, соответствующие отмеченной на области анализа строке (снизу).



а)



б)



в) г)

Рис. 6. Результаты оценки изображения № 1:
а) оценка коэффициента корреляции; б) оценка *PSNR*; в) оценка коэффициента контрастности; г) оценка размера файлов сжатых изображений.

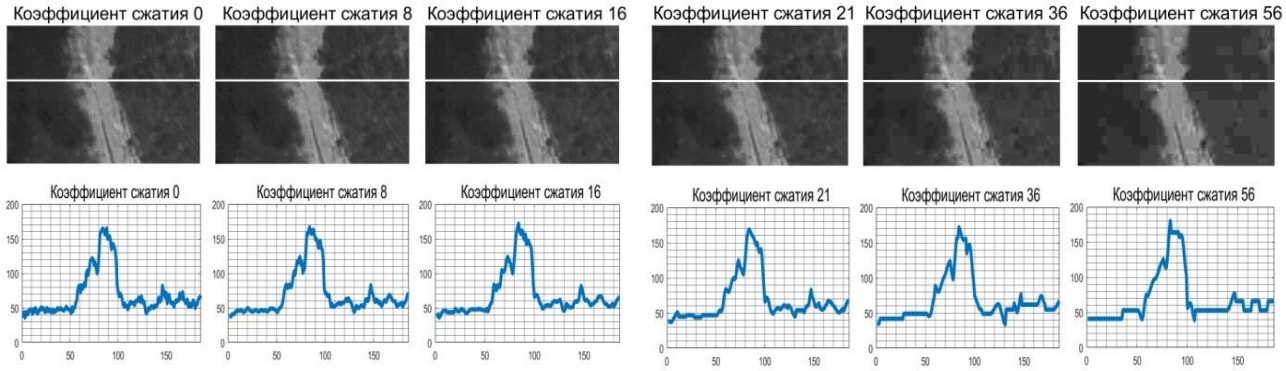
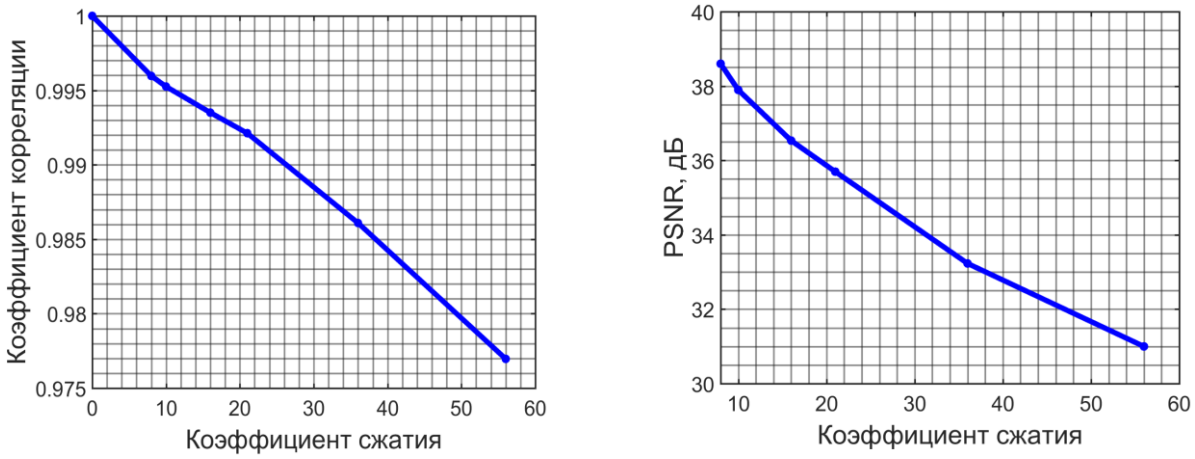
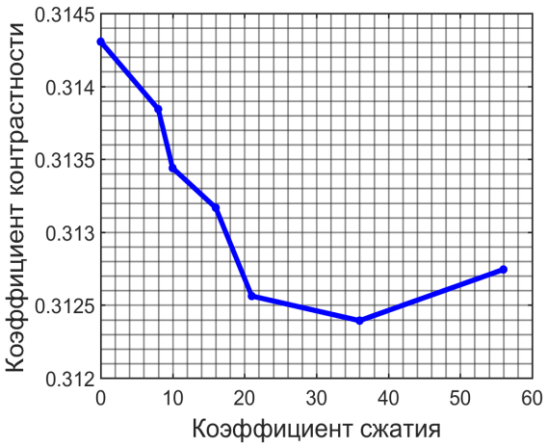


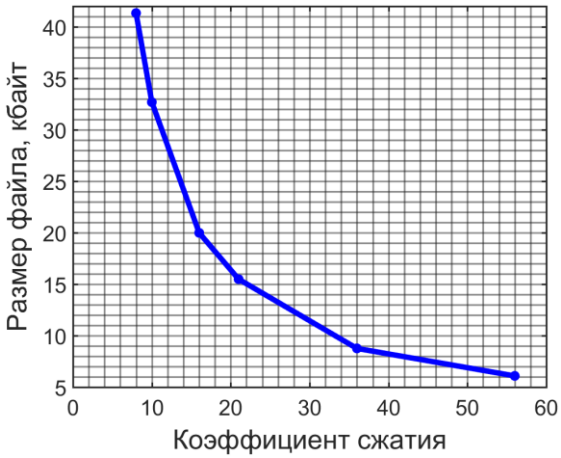
Рис. 7. Область анализа из изображения № 2 с разными степенями сжатия (сверху) и сигналы значений пикселей соответствующие отмеченной на области анализа строке (снизу).



а) б)



в)



г)

Рис. 8. Результаты оценки изображения № 2:
а) оценка коэффициента корреляции; б) оценка *PSNR*; в) оценка коэффициента контрастности; г) оценка размера файлов сжатых изображений.

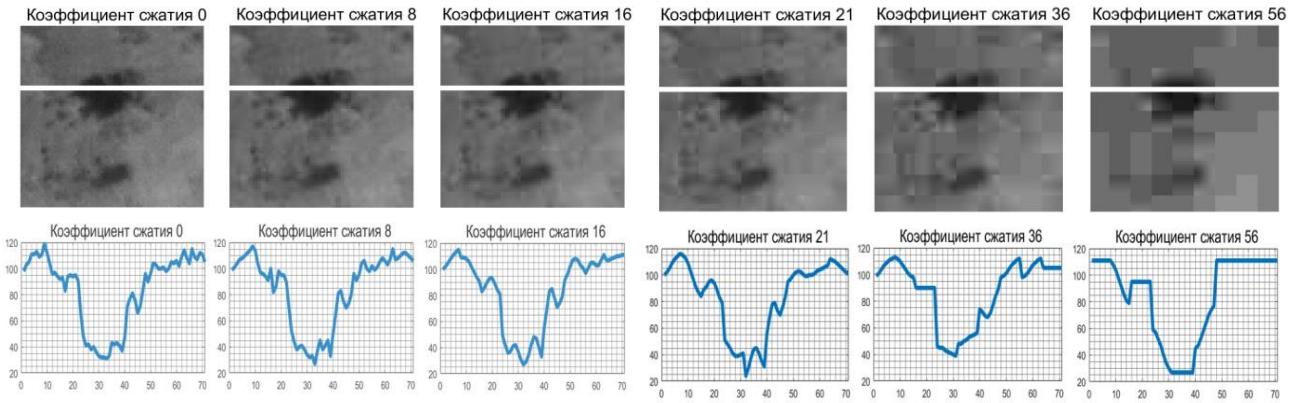
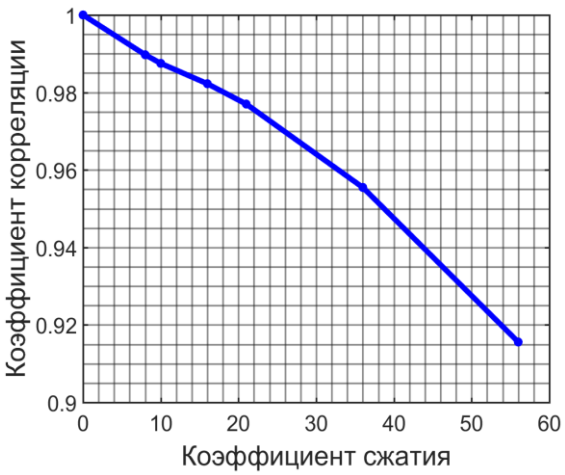
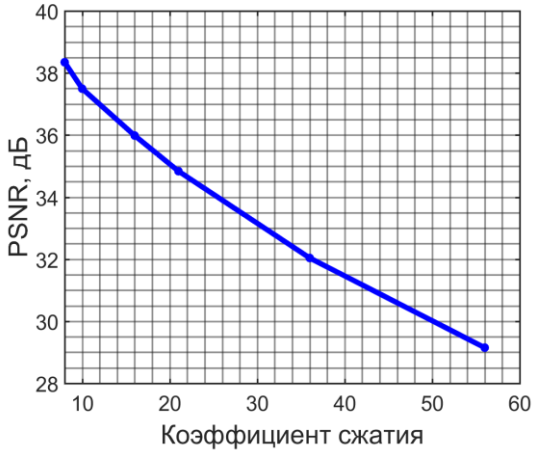


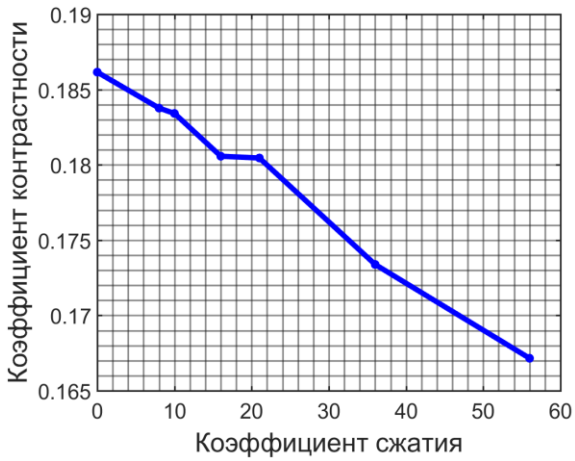
Рис. 9. Область анализа из изображения № 3 с разными степенями сжатия (сверху) и сигналы значений пикселей соответствующие отмеченной на области анализа строке (снизу).



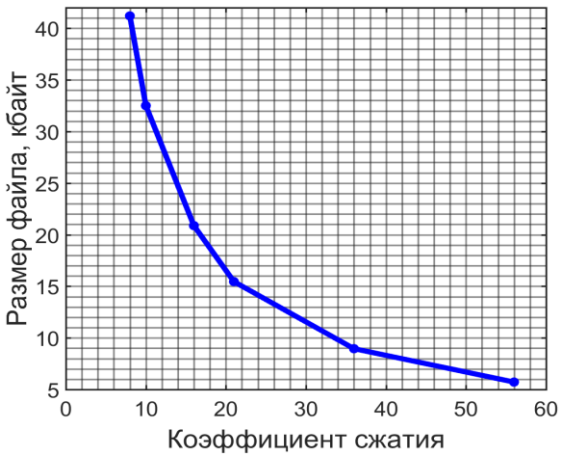
а)



б)



в)



г)

Рис. 10. Результаты оценки изображения № 3:
а) оценка коэффициента корреляции; б) оценка *PSNR*; в) оценка коэффициента контрастности; г) оценка размера файлов сжатых изображений.

Согласно рисункам 5, 7 и 9, с увеличением степени сжатия, отмечается ухудшение детальности изображения, при этом наиболее высокие коэффициенты сжатия 36 и 56 приводят к выраженному проявлению блочной структуры на изображении. Сигналы значений яркостей пикселей в анализируемой строке области изображения также демонстрируют ухудшение детализации и приобретают сглаженную форму по мере увеличения степени сжатия.

Коэффициенты корреляции между исходным и сжатыми изображениями, а также значения *PSNR*, согласно рисунку 6а-б, рисунку 8а-б и рисунку 10а-б уменьшаются практически линейно. В связи с этим следует отметить линейную зависимость качества сжатого изображения от степени сжатия, где по мере увеличения степени сжатия, увеличивается отличие (ухудшение качества) сжатых изображений от их исходного (эталонного по качеству) изображения.

Коэффициенты контрастности, приведенные на рисунках 6в, 8в и 10в, не имеют выраженного характера изменения в зависимости от степени сжатия, но имеют тенденцию к уменьшению с увеличением степени сжатия. Соответственно, можно отметить, что кроме степени сжатия, контрастность зависит и от особенностей объекта или характера сцены сжимаемого изображения.

Размеры файлов сжатых изображений, приведённые на рисунках 6г, 8г и 10г, имеют близкий к экспоненциальному характер изменения значений. Это

позволяет говорить о том, что эффективность, выражающаяся в зависимости степень сжатия – объём занимаемых данных, сохраняется на начальных значениях степеней сжатия (примерно до 20), а по мере продолжения увеличения значений степени сжатия, сокращение объёма занимаемых данных становится меньше.

Заключение

Сжатие сигналов ТВ изображения позволяет сократить объём передаваемой или хранимой видеоинформации. Использование повышенных степеней сжатия позволяет значительно сократить объём данных, но вместе с этим изменяется количество вносимых искажений в пространственную структуру изображений.

Уровень вносимых искажений зависит от степени сжатия и растёт с её увеличением. Данное заключение подтверждается результатами проведенной объективной оценки влияния сжатия на чёрно-белые ТВ изображения с использованием различных метрик.

В данной статье оценка качества изображений была проведена такими метриками, как коэффициент линейной корреляции Пирсона r_{xy}, пиковое отношение сигнал шум *PSNR*, коэффициент контрастности *K*, размер файла сжатого изображения.

Приведённые результаты оценки показывают, что для всех исходных изображений метрика линейной корреляции Пирсона r_{xy}, как и метрика *PSNR*, имеет равномерное падение с увеличением степени сжатия. Вместе с этим, метрика оценки контрастности *K* для некоторых изображений показывает различный уровень уменьшения контраста, не зависящий от степени сжатия. Это обусловлено тем, что сокращение количества мелких деталей текстуры фона на этапе квантования ведёт к увеличению однородности фона. Одновременно с этим, полученный в результате уровень сигнала однородного фона при оценке с уровнем сигнала объекта увеличивает контрастность фон-объект, что может сделать объекты на фоне более заметными. Однако распознавание этого объекта или его селекция системами машинного зрения по заданным параметрам формы, наоборот, может дать ложный результат из-за возможности значительного искажения формы данного объекта, вызванные процессом сокращения избыточности в сигнале изображения или кадра.

При анализе размера файлов сжатых изображений, наибольшего сокращения объёма данных можно добиться при использовании коэффициентов сжатия до 20, а при больших степенях сжатия сокращение объёма данных значительно снижается и убывает по форме экспоненты.

Соответственно, эффективное сжатие чёрно-белых ТВ изображений, при котором сохраняется приемлемое объективное и субъективное качество сжатых изображений с сокращением значительного объёма данных, реализуется при коэффициентах сжатия до 20. Выбор коэффициентов сжатия выше данной величины является нецелесообразным из-за значительных искажений в пространственной области изображения и отсутствия эффективности в сокращении объёма данных.

Литература

1. Дворкович А.В., Дворкович В.П. Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика). – М.: Техносфера, 2012. – 1009 с.
2. Сагдуллаев Ю.С., Ковин С. Д. Восприятие и анализ разноспектральных изображений. – М.: Спутник +, 2016. – 251 с.
3. Давыдов А.В. Сигналы и линейные системы: Тематические лекции. – Екатеринбург: УГГУ, ИГиГ, кафедра геоинформатики, 2005.
4. Гржибовский А.М. Корреляционный анализ // Экология человека, № 9. – Архангельск: СГМУ, 2008. – С. 50-60.
5. Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ. – М.: Физматгиз, 1963. – 500 с.
6. Арляпов С.А., Приоров А.Л., Хрящев В.В. Модифицированный критерий оценки качества восстановленных изображений // Цифровая обработка сигналов, № 2. – М., 2006. – С. 27-33.
7. Гайдышев И. Анализ и обработка данных. Специальный справочник. – СПб: Питер, 2001. – 752 с.

УДК 004.932

Травина Е.И., к.т.н.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВИЗУАЛЬНОГО КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ

В работе рассматривается структурный подход и безэталонная оценка визуального качества изображений в динамике. В основе оценки лежит изменение структуры изображений под воздействием внешних факторов.

Целью повышения визуального качества изображений в авиационных системах технического зрения является улучшение ситуационной осведомлённости экипажа. При этом необходимость безэталонной оценки визуального качества динамического ряда изображений становится очевидной.

Естественным подходом, опирающимся на специфику применения, является оценка результата обработки с точки зрения изменения дальности при решении оператором зрительной задачи. Оценка основана на изменении соотношения наблюдаемых контрастов исходного и обработанного изображений. Согласно положениям теории видимости, наблюдаемый контраст объекта определяется следующим образом [1]:

$$K'_{src} = K_0 \, \mathbf{exp}(-\alpha_{src} \, L), \quad K'_{res} = K_0 \, \mathbf{exp}(-\alpha_{res} \, L); \tag{1}$$

где K' – наблюдаемый контраст объекта на расстоянии L; K_0 – контраст в непосредственной близости от объекта; α – коэффициент прозрачности атмосферы; *res* – результирующее изображение; *src* – исходное изображение.

Метеорологическая дальность видимости (МДВ) [1]:

$$\tilde{L}_{src} = \frac{1}{\alpha_{src}} \mathbf{ln} \frac{1}{\varepsilon}, \quad \tilde{L}_{res} = \frac{1}{\alpha_{res}} \mathbf{ln} \frac{1}{\varepsilon}; \tag{2}$$

где $\varepsilon=0.05$ – пороговое значение контрастной чувствительности глаза.

Тогда, с учётом выражения (1), отношение МДВ результирующего и исходного изображений соответствует отношению наблюдаемых контрастов:

$$k_{дальн} = \frac{\tilde{L}_{res}}{\tilde{L}_{src}} = \frac{\frac{1}{\alpha_{res}} \ln \frac{1}{\varepsilon}}{\frac{1}{\alpha_{src}} \ln \frac{1}{\varepsilon}} = \frac{\alpha_{src}}{\alpha_{res}} = \frac{\ln K'_{src}}{\ln K'_{res}}. \quad (3)$$

Оценка контраста изображения основана на предложенном Пэли (Peli) [2] способе «квазилокального» измерения контраста в пространственно-частотном диапазоне с использованием локального среднего значения яркости в качестве локальной яркости фона. Позже С. Винклером (S.Winkler) было предложено измерение контраста с использованием семейства матриц изотропного локального контраста, являющихся результатом вейвлет-декомпозиции [3, 4]:

$$C_j(x,y) = \frac{\sqrt{2\left(D_j^h(x,y)^2 + D_j^v(x,y)^2 + D_j^d(x,y)^2\right)}}{A_j(x,y)}, \quad (4)$$

где A – матрица коэффициентов аппроксимации; D^h, D^v, D^d – матрицы вейвлет-коэффициентов горизонтальной, вертикальной и диагональной компонент детализирующей составляющей; j – уровень декомпозиции.

Согласно [5], с использованием (4) итоговая оценка контраста вычисляется следующим образом:

$$c = \frac{1}{S\,N} \sum_j \sum_{x,y} C_j(x,y), \quad (5)$$

где S – количество элементов изображения; N – глубина декомпозиции.

С учётом изложенного, выражение (3) примет вид:

$$k_{дальн} = \frac{\ln c^{src}}{\ln c^{res}}, \quad (6)$$

где $k_{дальн}$ – коэффициент изменения МДВ.

Рассмотренная оценка позволяет сравнить лишь два статичных изображения – исходное и результат обработки. Однако, не стоит забывать, что зрительная система человека чувствительна к подвижным ярким стимулам, поэтому движущиеся артефакты или резкие изменения средней яркости и контраста во времени сильно дезориентируют оператора. В связи с этим при работе с последовательностями изображений возникают следующие дополнительные требования [5]. Во-первых, временна́я стабильность. Результат

обработки должен быть стабилен во времени, т.е. изменения в результирующей последовательности должны быть вызваны только изменениями в исходной последовательности и не должны возникать в процессе преобразования. Во-вторых, временна́я согласованность. Все изменения, возникающие в исходной последовательности, должны быть представлены в результирующей последовательности без задержек.

Таким образом, необходима оценка локальных контрастов в динамике для различных последовательностей изображений.

Многомасштабный подход к измерению контраста позволяет представить структуру изображения в виде набора оценок локальных контрастов каждого уровня декомпозиции. Более точную итоговую оценку локальных контрастов можно получить с учётом краевых зон каждого уровня декомпозиции. Тогда выражение (5) примет вид:

$$c = \frac{1}{N}\sum_j \bar{c}_j, \quad \bar{c}_j = \frac{\sum_{x,y} C_j(x,y)}{S_j}; \tag{7}$$

где S_j – количество элементов, участвующих в декомпозиции на уровне j;
$\bar{c}$ – среднее значение локального контраста.

Проведенные исследования показали, что вклад составляющих текущего уровня декомпозиции в информативность изображения зависит от протяжённости его межэлементных корреляционных связей. Так, для изображений с малым радиусом корреляции наиболее значимыми являются первые уровни декомпозиции – с увеличением уровня их вклад в информативность исходного изображения уменьшается за счёт постепенного сглаживания микроструктуры. У изображений с большими радиусами корреляции, наоборот, с увеличением уровня декомпозиции наблюдается увеличение информационного вклада за счёт проявления значимых структурных элементов изображения на фоне исчезающей микроструктуры.

Другими словами, локальные контрасты уровней декомпозиции характеризуют структуру изображения, при этом изменение метеорологической обстановки приводит к изменениям его структуры.

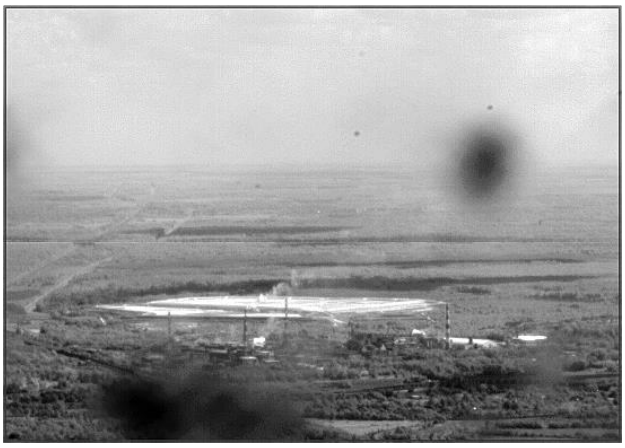
Рассмотрим изменение структуры изображений в результате различных преобразований в процессе прохождения типичной видеопоследовательности «ГРЭС_2018.07.18_13.33» с монотонным увеличением масштаба и значительными межкадровыми смещениями. Каждый кадр видео-

последовательности обрабатывался при помощи линейного контрастирования, эквализации (выравнивания яркостного распределения), а также исследуемого алгоритма повышения визуального качества изображений.

В основе исследуемого алгоритма лежит разделение изображения на 2 составляющие: сглаженную яркостную и детальную, а также табличное преобразование яркостной составляющей и согласованное преобразование детальной составляющей. Сглаженная яркостная составляющая является результатом свёртки исходного изображения 2-D биномиальным фильтром 4-го порядка. Таблица преобразования формируется на основе объединения гистограмм сглаженной яркостной и детальной составляющих. Это обеспечивает адаптивность преобразования к сюжету обрабатываемого изображения и позволяет обеспечить стабильность яркости при обработке динамического ряда изображений. Результат объединения дополняется распределением значений дифференциального порога восприятия равно-контрастного ряда яркостей. Таким образом устанавливается соответствие между яркостью и светлотой, её субъективной характеристикой, что позволяет учесть особенности зрительного восприятия равноконтрастного ряда яркостей. Кроме того, по результатам однократного предварительного анализа структуры исходного изображения могут использоваться две дополнительные функции: сглаживание шумовой микроструктуры и/или усиления мелкомасштабной детальности, воспринимаемой как повышение резкости результирующего изображения. По результатам анализа первого кадра рассматриваемой последовательности обработка дополнена функцией повышения резкости.

На рисунке 1а приведено исходное изображение начального кадра последовательности и результаты его обработки перечисленными способами (Рисунок 1б-в), а на рисунке 2 – гистограммы яркости этих изображений.

а) исходное изображение



б) результат обработки исследуемым алгоритмом

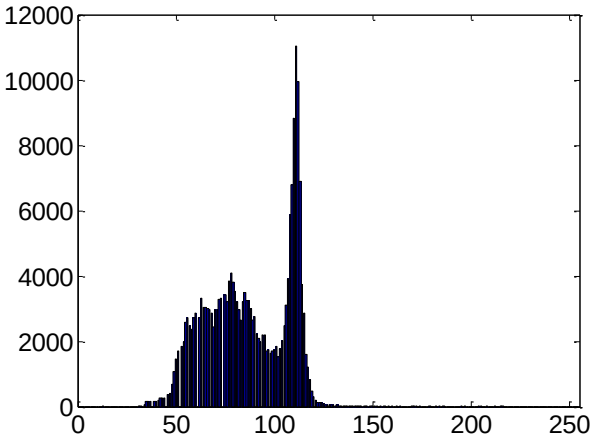
в) результат линейного контрастирования

г) результат выравнивания гистограммы яркости

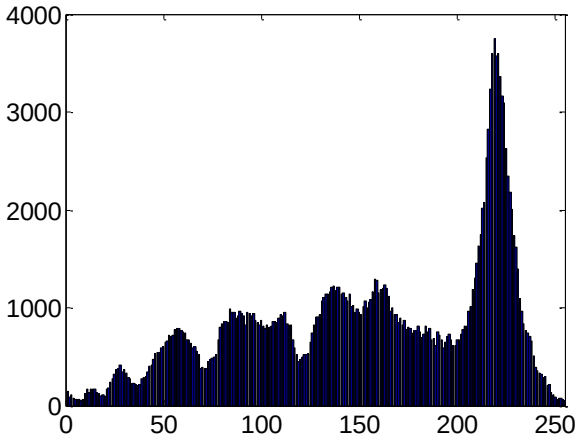
Рис. 1. Исходное изображение и результаты обработки первого кадра последовательности.

Особенностью первого кадра последовательности является насыщенность переднего плана мелкими деталями, их постепенное размытие по мере удаления к линии горизонта. Линия горизонта размыта, значительную часть изображения занимает небо. Яркость исходного изображения распределена по всему диапазону (Рисунок 2а), поэтому результат линейного контрастирования незначительно отличается от исходного изображения (Рисунки 1в и 2в). Ограничение числа отсчётов яркости в результате выравнивания яркостной гистограммы, о чём свидетельствует её разрежённость (Рисунок 2г), является причиной нежелательного эффекта постеризации, особенно заметном на небе, а также наличием излишне затенённых участков (Рисунок 1г).

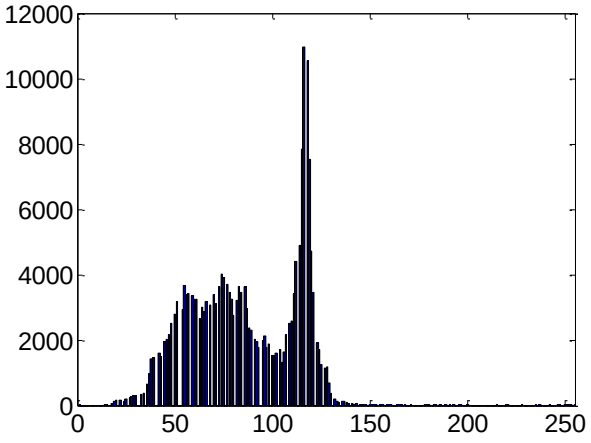
От этих недостатков свободен результат обработки исследуемым алгоритмом (Рисунки 1б и 2б), причём форма гистограммы яркости схожа с гистограммой яркости исходного изображения, что свидетельствует об адаптивности преобразования к сюжету обрабатываемого изображения.



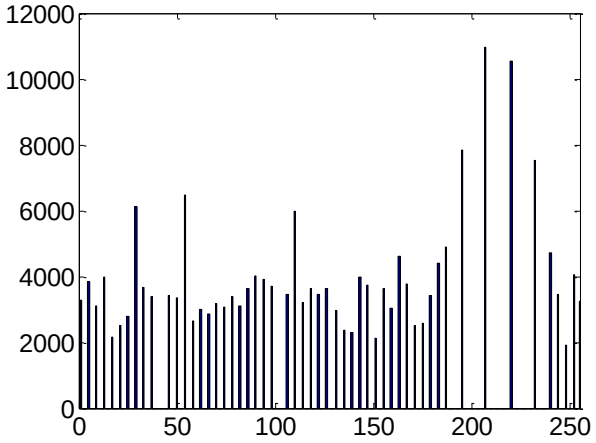
а) исходное изображение



б) результат обработки исследуемым алгоритмом



в) результат линейного контрастирования



г) результат выравнивания гистограммы яркости

Рис. 2. Яркостные распределения исходного изображения и результатов обработки первого кадра последовательности.

Последний кадр последовательности (Рисунок 3а) содержит крупноразмерные структурные элементы на фоне с выраженной мелкомасштабной детальностью, линия горизонта отсутствует.

а) исходное изображение

б) результат обработки разработанным алгоритмом

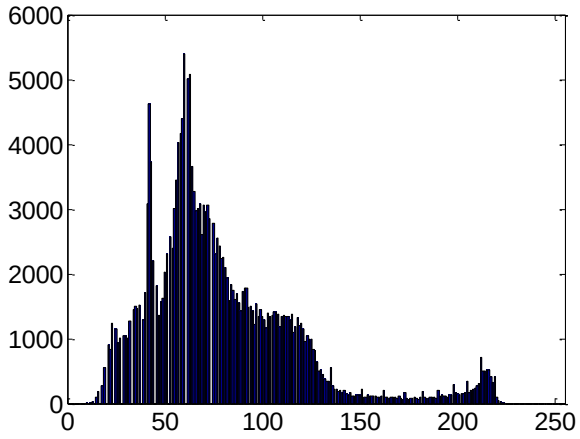
в) результат линейного контрастирования

г) результат выравнивания гистограммы яркости

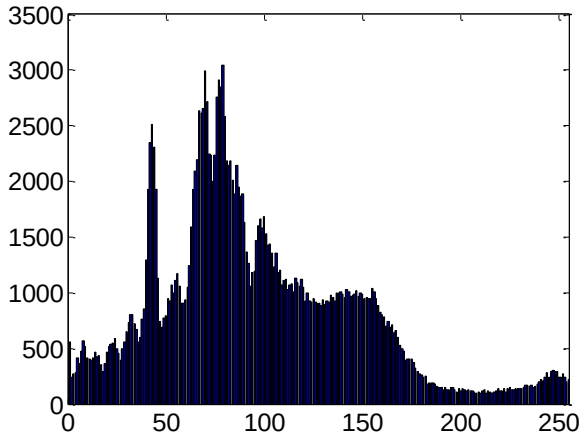
Рис. 3. Исходное изображение и результаты обработки последнего кадра последовательности.

Яркость исходного изображения распределена по всему диапазону (Рисунок 4а), поэтому результат линейного контрастирования незначительно отличается от исходного изображения (Рисунки 3в и 4в).

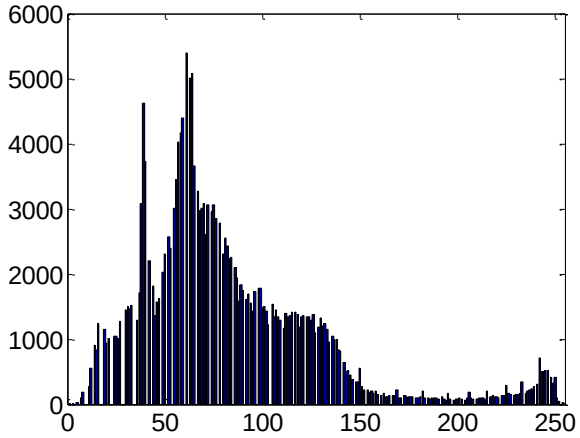
Ограничение числа отсчётов яркости в результате выравнивания гистограммы (Рисунки 3г и 4г) привело к ухудшению различимости крупных деталей на фоне растительности, который воспринимается почти засвеченным со слабо проработанными деталями. Точечные и малоразмерные объекты фона потеряны в результате обработки. При обработке исследуемым алгоритмом (Рисунки 3б и 4б) форма гистограммы яркости схожа с гистограммой яркости исходного изображения, что свидетельствует об адаптивности преобразования к сюжету обрабатываемого изображения.



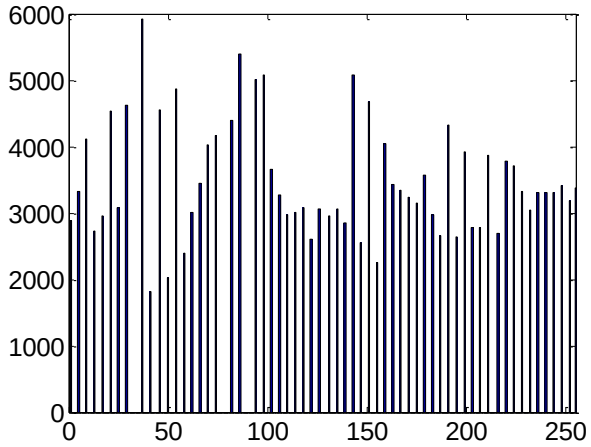
а) исходное изображение



б) результат обработки исследуемым алгоритмом



в) результат линейного контрастирования



г) результат выравнивания гистограммы яркости

Рис. 4. Яркостные распределения исходного изображения и результатов обработки последнего кадра последовательности.

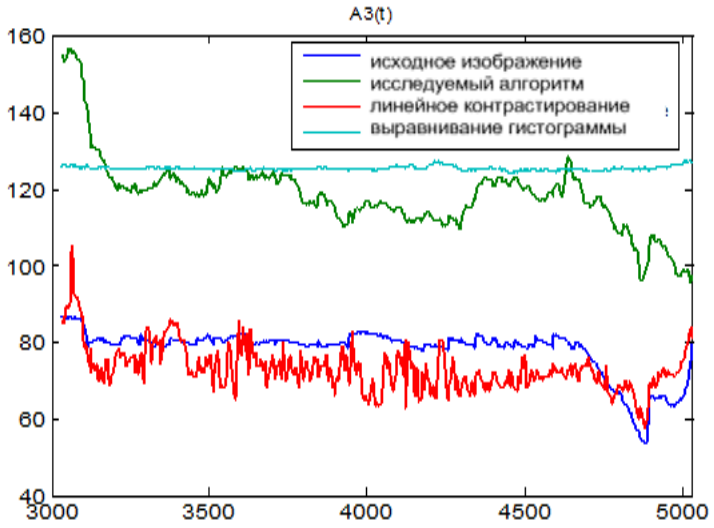


Рис. 5. Изменение средней яркости (внизу – номер кадра).

На рисунке 5 приведены временны́е зависимости средней яркости, вычисляемой путём усреднения коэффициентов аппроксимации 3-го уровня декомпозиции на каждом кадре последовательности. В таблице 1 представлены статистические характеристики этого процесса.

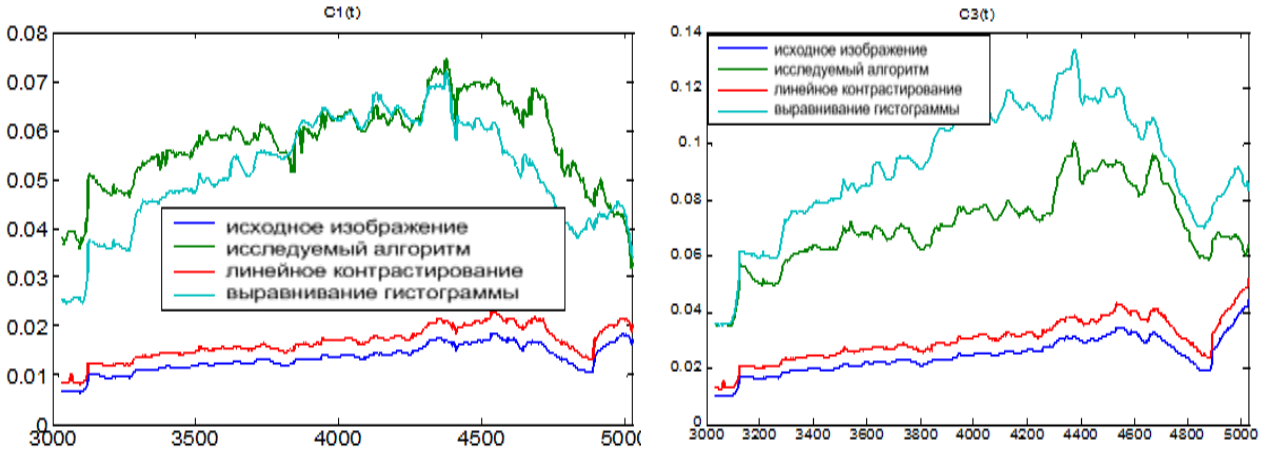
Таблица 1. Статистические характеристики изменения средней яркости.

Вариант обработки	m_{c3}	σ_{c3}
Исходное изображение	77,91	0,272
Обработка исследуемым алгоритмом	118,48	0,450
Линейное контрастирование	73,03	0,266
Выравнивание гистограммы яркости	125,34	0,023

Несмотря на незначительный визуальный эффект линейного контрастирования на рассматриваемом сюжете, это преобразование приводит к заметным скачкам средней яркости (Рисунок 5), при этом изменение локальных контрастов (7) при линейном контрастировании не отличается от изменения локальных контрастов исходного изображения (Рисунок 6).

Наиболее стабильный результат с точки зрения яркости (Рисунок 5, Таблица 1) получен при помощи выравнивания гистограммы яркости, однако локальные контрасты (7) не столь стабильны (Рисунок 6, Таблица 2).

Межкадровые изменения средней яркости при обработке исследуемым способом (Рисунок 5, Таблица 1) больше, но характер зависимости средней яркости от времени соответствует аналогичной зависимости, полученной для исходного изображения, что также свидетельствует об адаптивности исследуемого преобразования. Повышение резкости, представляющее собой усиление мелкомасштабной детальности, увеличивает и несколько дестабилизирует локальные контрасты 1-го уровня декомпозиции (Рисунок 6а, 7а и Таблица 2).

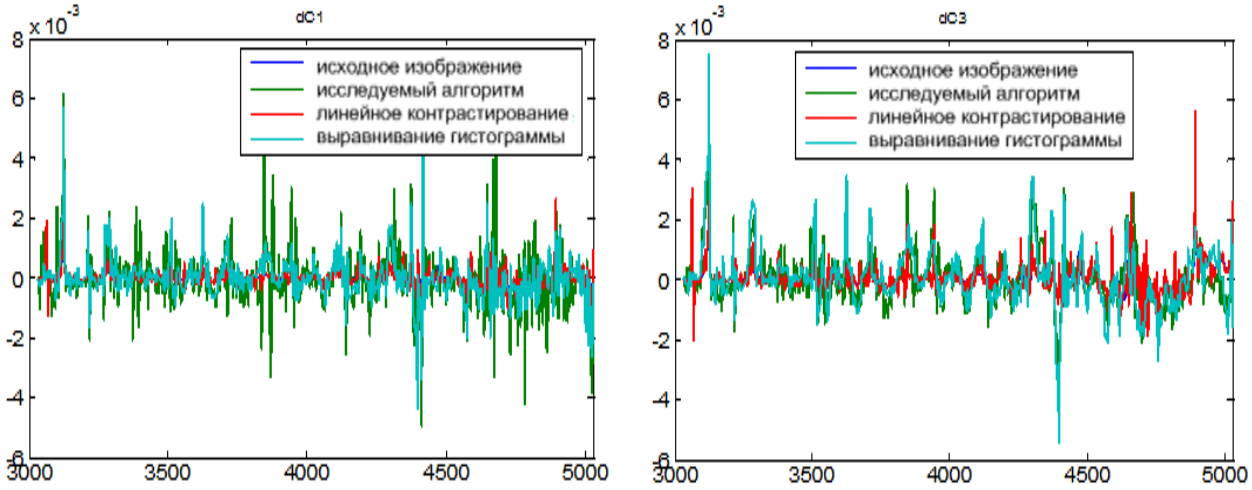


а) 1-й уровень вейвлет-декомпозиции б) 3-й уровень вейвлет-декомпозиции

Рис. 6. Изменение средних значений локального контраста (внизу – номер кадра).

Таблица 2. Статистические характеристики изменения локальных контрастов.

Вариант обработки	$m_{c1} * 10^{-2}$	$\sigma_{c1} * 10^{-4}$	$m_{c2} * 10^{-2}$	$\sigma_{c2} * 10^{-4}$	$m_{c3} * 10^{-2}$	$\sigma_{c3} * 10^{-4}$
Исходное изображение	1,34	1,22	1,89	2,02	2,43	2,83
Обработка исследуемым алгоритмом	5,74	3,90	6,32	5,45	7,09	6,24
Линейное контрастирование	1,66	1,47	2,35	2,43	3,03	3,36
Выравнивание гистограммы яркости	5,16	4,94	7,28	7,74	9,27	9,81



а) 1-й уровень вейвлет-декомпозиции б) 3-й уровень вейвлет-декомпозиции

Рис. 7. Межкадровое изменение средних значений локального контраста (внизу – номер кадра).

Однако, к 3-му уровню декомпозиции локальные контрасты значимых структурных элементов становятся более стабильными, чем в случае выравнивания яркостного распределения (Рисунок 6б, 7б, Таблица 2).

Итоговая оценка рассмотренных преобразований приведена на рисунке 8 и в таблице 3.

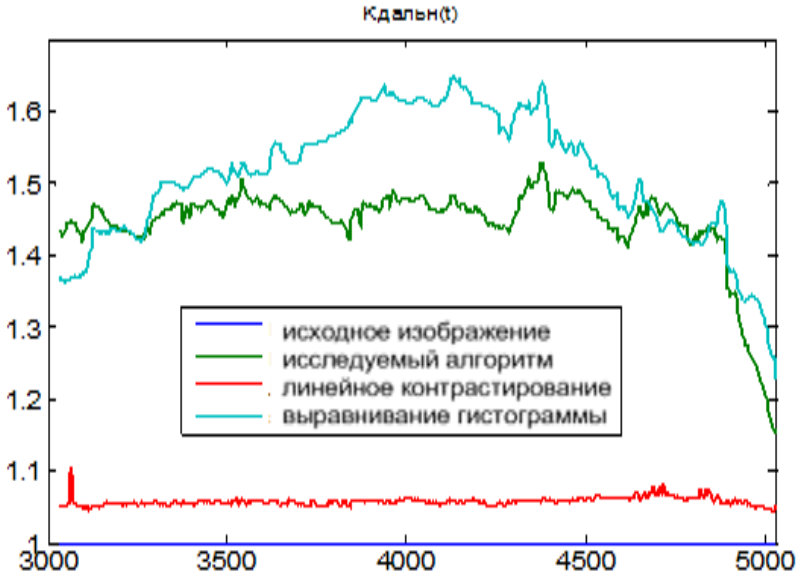


Рис. 8. Оценка изменения МДВ (6) (внизу – номер кадра).

Таблица 3. Статистические характеристики оценки изменения МДВ.

Вариант обработки	$\mathbf{m_k}$	$\mathbf{\sigma_k * 10^{-3}}$
Исходное изображение	1	0
Обработка исследуемым алгоритмом	1,446	2,61
Линейное контрастирование	1.057	0,25
Выравнивание гистограммы яркости	1,511	3,98

Таким образом, структурный подход, основанный на многомасштабном представлении изображений, позволяет количественно оценивать в динамике не только визуальное качество изображений, но и динамические характеристики результата обработки – временну́ю стабильность и временну́ю согласованность. Предложенная безэталонная количественная оценка результата обработки динамического ряда изображений позволяет оценивать влияние преобразований на структуру изображения, и, тем самым, выявлять и, при необходимости, корректировать динамические характеристики алгоритма уже на этапе его разработки.

Кроме того, сравнительный анализ различных преобразований показал, что исследуемый алгоритм обеспечивает стабильную адаптацию к сюжету при среднем коэффициенте изменения МДВ (6) в 1,45 раза.

Литература

1. Шаронов В.В. Наблюдение и видимость – М.: Военное издательство Министерства обороны Союза ССР, 1953.
2. Peli E., Contrast in complex images // Journal of the Optical Society of America, 1990. – Vol. 7, Issue 10. P. 2032-2040.
3. Winkler S., Vandergheynst P. Computing isotropic local contrast from oriented pyramid decompositions // Proc. 6th International Conference on Image Processing, Japan, 1999. – Vol. 4. P. 420-424.
4. Winkler S. Vision Models and Quality Metrics for Image Processing Applications // Ph.D. Thesis № 2313, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 2000. P.10.
5. Susu Yao, Weisi Lin, S. Rahardja, EePing Ong, Zhongkang Lu Video quality evaluation based on wavelet visible difference measure. URL: http://enpub.fulton.asu.edu/resp/vpqm2006/papers06/301.pdf
6. Rockinger O., Fechner T. Pixel-level image fusion: The case of image sequences // Proc. SPIE, 1998. – Vol. 3374. P. 378-388.

УДК 621.397: 629.05

Арзуманян Э.П., д.т.н., с.н.с.
Миколайчук Д.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ

Рассматривается система автосопровождения объектов по телевизионному изображению, используемая в частности для мониторинга ландшафтов сложной пересечённой местности. Множество параметров определяет возможности системы по достоверной идентификации объекта слежения и обеспечению её улучшенных динамических характеристик. Целью предлагаемой работы является исследование поведения такой системы с помощью разработанной математической модели.

Введение

Телевизионные (ТВ) системы автосопровождения в последние годы нашли широкое применение во многих отраслях народного хозяйства, в том числе, в системах наблюдения и безопасности [1]. Одна из проблем таких систем состоит в обеспечении достоверной идентификации объектов, статистические характеристики которых при изотропном изображении сложно отличать от характеристик подстилающего фона. Для решения этой проблемы производят сужение пределов поиска, что позволяет использовать проекции вычисленного вектора межкадрового смещения изображения в качестве приращения координат объекта. При этом сами координаты, служащие сигналами управления, вычисляют методом накопления дифференциальной ошибки [2, 3].

В [4] построена математическая модель, позволяющая исследовать систему в случаях, когда высокая подвижность объекта может вызвать срыв непрерывного слежения. В качестве входного воздействия для анализа используется синусоидальный сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [5]. Этот приём позволяет выявить ряд свойств, представляющих интерес при проектировании систем аналогичного назначения, а сама модель представляет интерес для разработчиков телевизионных систем автосопровождения объектов.

Постановка задачи

Задача состоит в определении граничных значений параметров системы в случаях срыва автосопровождения путём математического моделирования.

Для формализации этой задачи следует обратиться к материалу, опубликованному в [4], где приводится описание системы авторегулирования, состоящей из двух контуров. Структурная схема рассматриваемой системы приведена на рисунке 1. На основе этой схемы построена математическая модель, с помощью которой проведены исследования системы. В рассматриваемой системе слежения электронный контур вырабатывает сигналы x_i для управления электромеханическим приводом ТВ-камеры. Такая система обладает астатизмом первого порядка и является устойчивой.

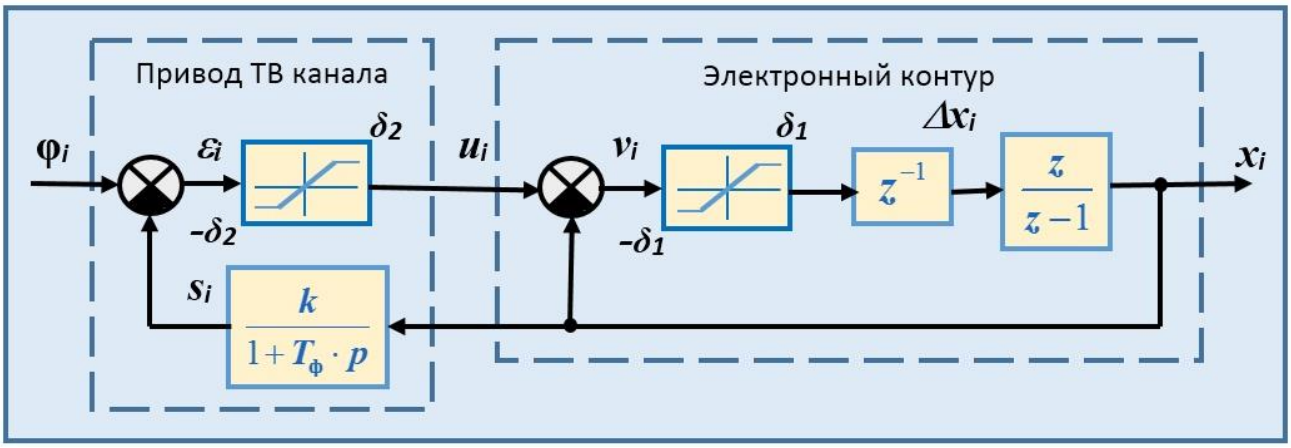


Рис. 1. Структурная схема исследуемой двухконтурной ТВ-системы автосопровождения.

Входной сигнал φ_i является возмущающим для ТВ-привода и создаёт перемещения изображения, которые при разомкнутой системе вызывают межкадровое смещение изображения на входе v_i электронного контура. Блок ограничения имеет пороги $\pm\delta_1$, соответствующие размерам упомянутой выше суженной области, и реализован в виде подвижного электронного строба. В пределах $\pm\delta_1$ блок z^{-1} осуществляет идентификацию объекта с задержкой на один такт работы, равный периоду ТВ-кадра Δt и, с учётом смещения изображения, вычисляет приращение сигнала управления $\Delta x(t)$. В блоке $\frac{z}{z-1}$ вычисляется координата $x(t)$ в мгновенном поле зрения ТВ-камеры следующим образом:

$$x(t) = x\left(t - \Delta t\right) + \Delta x\left(t\right). \quad (1)$$

В замкнутой системе привод компенсирует входное возмущение сигналом s_i. В этом случае сигнал ε_1, представляющий динамическую ошибку по угловой скорости линии визирования, будет иметь пределы $\pm\delta_2$ устойчивой работы, определяемые мгновенным углом зрения ТВ-камеры.

Для определения частотных характеристик системы входной сигнал φ_i представлен в виде синусоидального сигнала с ЛЧМ [5]

$$\varphi_i = A \cdot \sin\left[2\pi \cdot f_0 \cdot i \cdot \Delta t + \pi \cdot m \cdot \frac{\left(i \cdot \Delta t\right)^2}{T^2}\right], \quad (2)$$

где: A – амплитуда сигнала; m – база модуляции; f_0 – начальная частота; T – длительность сигнала ЛЧМ.

Интерес представляет поведение системы при различных режимах её функционирования. Для этого следует выделить основные параметры, от которых существенно зависит качество её работы.

Далее рассматривается качество работы при вариации параметров системы. При этом критерием качества следует считать граничное значение входной частоты сигнала, превышение которого вызывает срыв непрерывного слежения. Это происходит при достижении предельно допустимых значений угловой скорости или углового ускорения линии визирования ТВ-системы. Основными параметрами системы являются:

- размеры электронного строба, обозначенные ограничителями δ_1;
- угол зрения объектива ТВ системы, обозначенный ограничителями δ2;
- постоянная времени Тф передаточной функции электромеханического привода ТВ-системы;
- амплитуда входных возмущений φ;
- частота ТВ-кадров.

Решение задачи

Для решения поставленной задачи сначала следует определить функцию передаточного звена и замкнуть обратную связь в цепи электромеханического привода. Применив метод Эйлера представления производной [6] к сигналу s_i (Рисунок 1) на выходе передаточного звена с характеристикой

$$w(p) = \frac{k}{1 + T_{\phi} \cdot p}\ , \qquad (3)$$

можно получить уравнение в дискретной форме

$$s_{i+1} = s_i + \left[\frac{x_i \cdot k - s_i}{T_{\phi}} \right] \cdot \Delta t\ , \qquad (4)$$

где $x_i = v_{i-1}$.

Необходимые результаты моделирования получают при изменении значений перечисленных выше параметров. Таким образом, в качестве переменных в модели используются следующие параметры:

A – амплитуда входного частотно-модулированного сигнала **φ;**

θ – угол зрения объектива ТВ-камеры;

T_{ϕ} – постоянная времени передаточного звена привода;

n – число пикселей изображения при межкадровом сдвиге;

F_k – частота ТВ-кадров.

При этом пределы ограничения определяются как $\delta_1 = n \cdot \frac{\theta}{2}$ и $\delta_2 = q \cdot \theta$.

Некоторые параметры модели остаются без изменения на протяжении всего эксперимента, а именно:

$z = 625$ – количество ТВ-элементов в угле зрения θ;

$m = 12$ – база модуляции входного сигнала φ (частота изменяется от f_0 до 1, 975 Гц);

$q = 0,4$ – коэффициент, обозначающий зону перемещения электронного следящего строба в угле зрения θ;

$f_0 = 0,1$ – начальная частота модуляции (Гц);

$T = 8\ c$ – длительность процесса моделирования;

k = 1 – коэффициент усиления в цепи передаточной функции (3).

Использование входного сигнала вида (2) позволяет испытывать систему в широком диапазоне частот, определяемом базой m. При этом, в зависимости от внутренних параметров системы, срыв непрерывного слежения будет происходить в разные моменты времени сигнала **φ,** следовательно, на разных частотах.

Для определения граничных частот использовалось выражение мгновенной частоты [5], полученное дифференцированием полной фазы сигнала (2):

$$\boldsymbol{fm}_i = \boldsymbol{f}_0 + \frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{T}^2} \cdot i \cdot \Delta t \ , \quad \text{где } \Delta t = \frac{1}{\boldsymbol{F}_k} . \tag{5}$$

Ограничитель $\boldsymbol{\delta_1}$ останавливает процесс непрерывного слежения на граничной частоте $\boldsymbol{f}_{\text{эл}}^{\text{гр}}$, которая вычислена ниже. Пользуясь операторами математического пакета Mathcad (*until* и *last*), процедуру ограничения можно выразить следующим образом:

$$\Delta \boldsymbol{x}_i = until\left[-\left(\boldsymbol{v}_i < -\boldsymbol{\delta}_1 \vee \boldsymbol{v}_i > \boldsymbol{\delta}_1\right), \boldsymbol{v}_i\right] , \tag{6}$$

где *until* означает «*до тех пор, пока*».

Тогда для электронного контура граничная частота $\boldsymbol{f}_{\text{эл}}^{\text{гр}}$ определится как

$$\boldsymbol{f}_{\text{эл}}^{\text{гр}} = \boldsymbol{fm}_{last(\Delta x)} \ , \tag{7}$$

где $last(\Delta x) \cdot \Delta t$ – временно́й момент достижения граничной частоты (*last* – номер последнего элемента вектора ***fm***).

Аналогичным образом формируют сигнал, проходящий через ограничитель $\boldsymbol{\delta_2}$, обозначив его через $\boldsymbol{\Delta\varepsilon}$ (на схеме не показан для отличия от сигнала ***u***).

$$\boldsymbol{\Delta\varepsilon}_i = until\left[-\left(\boldsymbol{\varepsilon}_i < -\boldsymbol{\delta}_2 \vee \boldsymbol{\varepsilon}_i > \boldsymbol{\delta}_2\right), \boldsymbol{\varepsilon}_i\right] , \tag{8}$$

а для привода ТВ-камеры (электромеханического контура) граничная частота $\boldsymbol{f}_{\text{ме}}^{\text{гр}}$ определится как

$$\boldsymbol{f}_{\text{ме}}^{\text{гр}} = \boldsymbol{fm}_{last(\Delta\varepsilon)} \ . \tag{9}$$

По полученным граничным частотам $\boldsymbol{f}_{\text{эл}}^{\text{гр}}$ и $\boldsymbol{f}_{\text{ме}}^{\text{гр}}$ вычисляют первую производную $\boldsymbol{f}'_{\text{ме}}(t)$ – для определения угловой скорости привода ТВ-камеры, и вторую $\boldsymbol{f}''_{\text{эл}}(t)$ – для определения углового ускорения линии визирования в электронном контуре. Далее рассмотрим гармонические колебания с найденными частотами $\boldsymbol{f}_{\text{эл}}^{\text{гр}}$ и $\boldsymbol{f}_{\text{ме}}^{\text{гр}}$. Для механического контура имеем

$$\boldsymbol{f}_{\text{ме}}(t) = \boldsymbol{A} \cdot \sin\left(2\pi \boldsymbol{f}_{\text{ме}}^{\text{гр}} \cdot t\right), \text{ то} \tag{10}$$

$$f'_{\text{ме}} = \frac{d}{dt} f_{\text{ме}}(t) = A \cdot 2\pi f_{\text{ме}}^{\text{гр}} \cdot \cos\left(2\pi f_{\text{ме}}^{\text{гр}} \cdot t\right), \quad (11)$$

Аналогично (10) для электронного контура записывают

$$f_{\text{эл}}(t) = A \cdot \sin\left(2\pi f_{\text{эл}}^{\text{гр}} \cdot t\right), \text{ и} \quad (12)$$

$$f''_{\text{эл}} = \frac{d^2}{dt^2} f_{\text{эл}}(t) = -A \cdot 4\pi^2 \cdot \left(f_{\text{эл}}^{\text{гр}}\right)^2 \cdot \sin\left(2\pi f_{\text{эл}}^{\text{гр}} \cdot t\right). \quad (13)$$

Максимальные значения функций (11) и (13) и есть установленные критерии качества работы системы, на основе которых получены результаты исследования.

Результаты исследования

Результаты получены путём запуска модели для каждого из вышеперечисленных параметров. При этом остальным текущим параметрам присвоены начальные данные таким образом, чтобы рассматриваемые процессы происходили в пределах времени моделирования $T = 8\,c$. План проведения запусков модели представлен в следующей таблице.

План проведения запусков модели.

Параметр	F_k	A	T_ϕ	θ	n
F_k, Гц	**50÷275**	50	50	50	50
A, °	1,5	**1,5÷2,4**	1,5	1,5	1,5
T_ϕ, с	0,15	0,2	**0,15÷0,005**	0,15	0,15
θ, °	2,7	4	2,2	**2÷3,35**	3
n	6	6	15	10	**10÷28**

В соответствии с параметрами, приведёнными в таблице, далее представлены временные графики (Рисунки 2-6), полученные на основе максимальных значений функций (11) и (13).

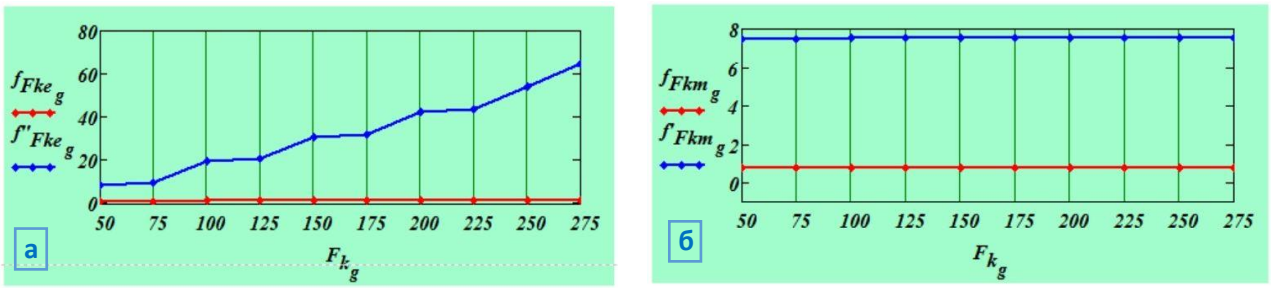


Рис. 2. Увеличение частоты кадров $\boldsymbol{F_k}$:

а) приводит к существенному увеличению допустимого углового ускорения линии визирования f''_{Fke} при слабом увеличения граничной частоты f_{Fke};

б) практически не изменяет угловую скорость. $\boldsymbol{f'_{Fkm}}$

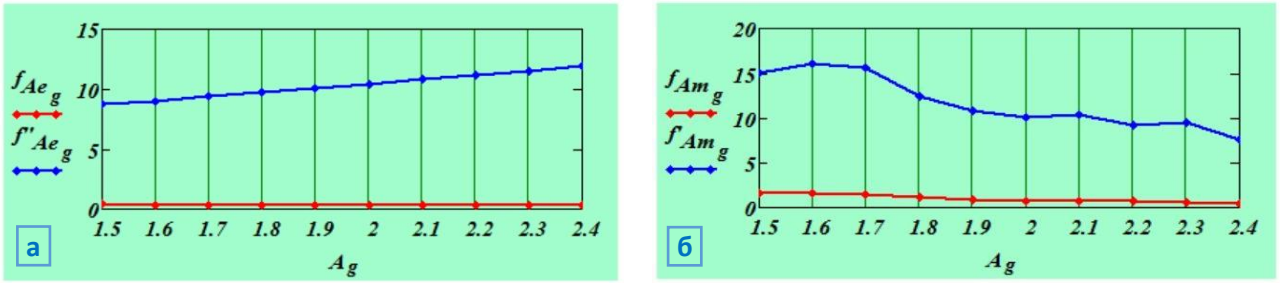


Рис. 3. Увеличение амплитуды входного сигнала $\boldsymbol{A}$:

а) линейно увеличивает угловое ускорение линии визирования f''_{Ae};

б) падение граничной частоты f_{Am} вызывает понижение угловой скорости f''_{Am}.

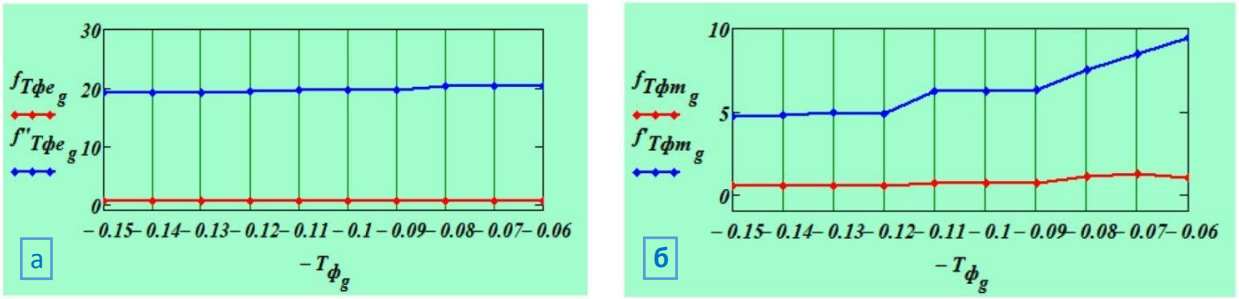


Рис. 4. Уменьшение постоянной времени в цепи привода $\boldsymbol{T_ф}$:

а) незначительно влияет на угловое ускорение линии визирования $f''_{Tфe}$;

б) существенно увеличивает угловую скорость $f'_{Tфm}$. Дальнейшее уменьшение $\boldsymbol{T_ф}$ может привести к возбуждению системы вплоть до срыва (см. рисунок 10).

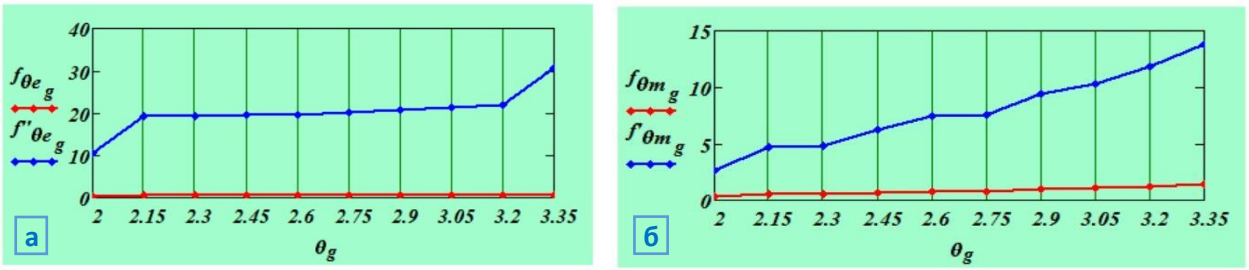


Рис. 5. С увеличением угла зрения объектива **θ**:

а) незначительно увеличивается угловое ускорение $f''_{\theta e}$ (скачкообразные переходы вызваны порогами $\boldsymbol{\delta_1}$ и $\boldsymbol{\delta_2}$); б) существенно увеличивается допустимая угловая скорость $f'_{\theta m}$.

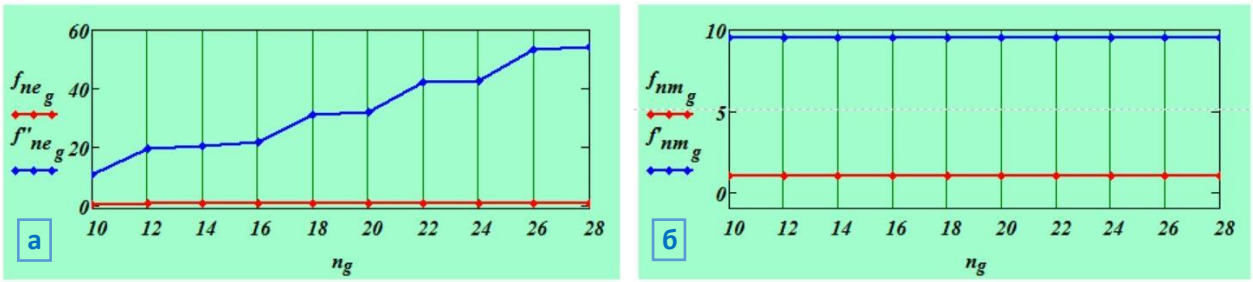


Рис. 6. Увеличение параметра ***n***:

а) существенно увеличивает допустимое угловое ускорение f''_{ne} и при этом –

б) нисколько не изменяет граничную угловую скорость f'_{ne}.

Для большей наглядности ниже приводятся отдельные примеры работы модели (Рисунки 7-10). Пунктиром показан входной сигнал **φ**.

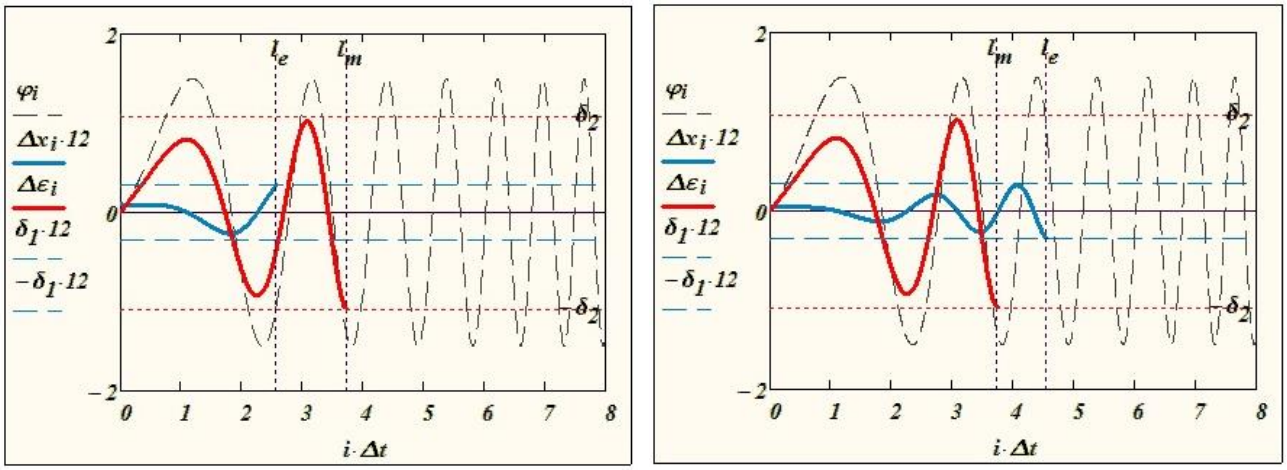


Рис. 7. Увеличение параметра ***Fk*** приводит к увеличению углового ускорения – синяя кривая увеличена в 12 раз для лучшей визуализации.

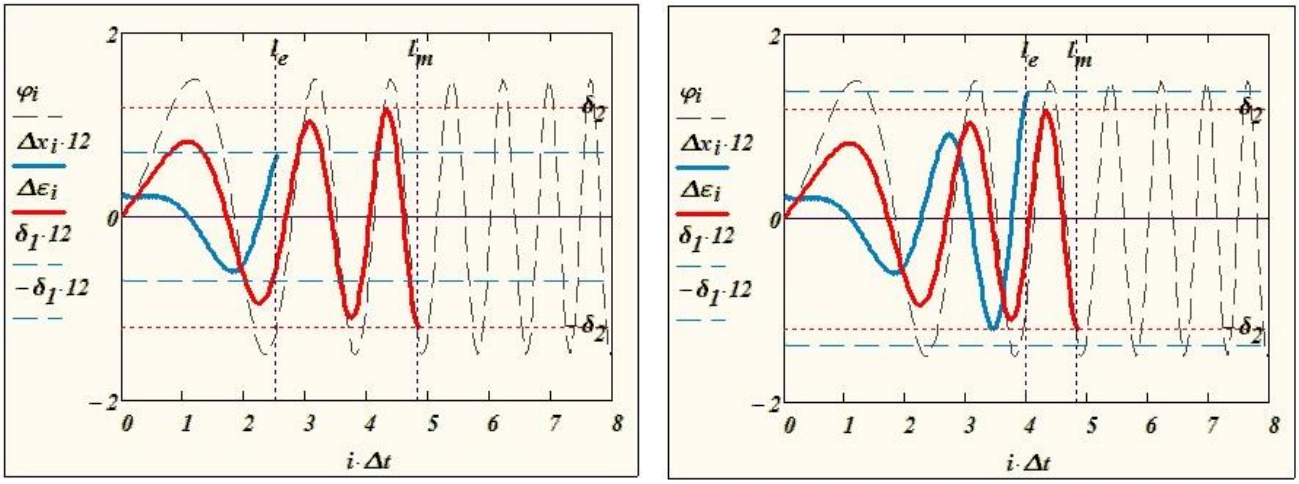


Рис. 8. Увеличение параметра ***n*** расширяет пределы ограничения **ε1** – синие штриховые прямые.

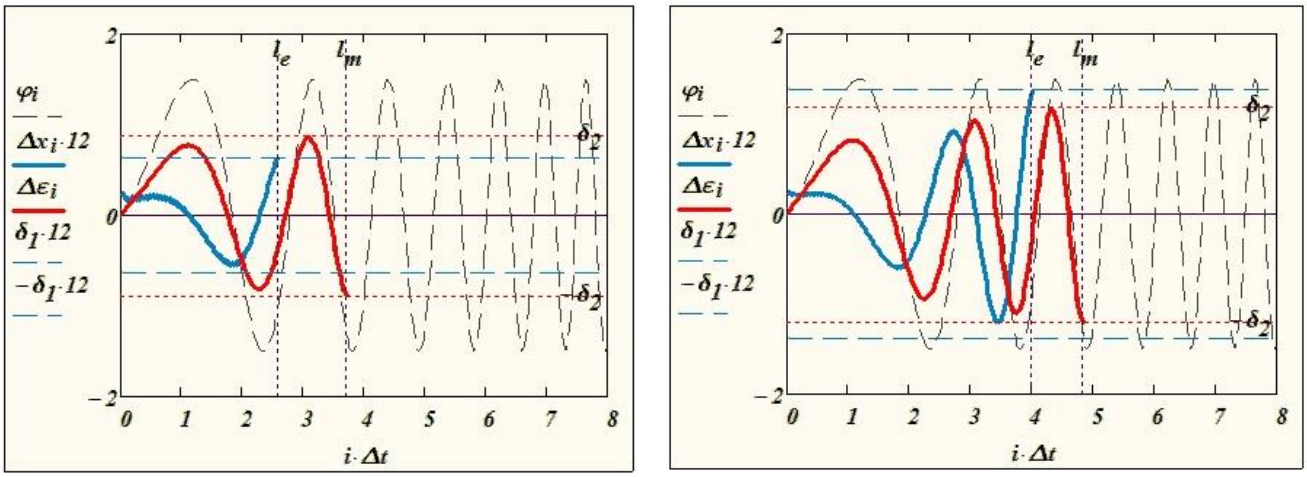


Рис. 9. Увеличение параметра **θ** приводит к расширению порогов **δ1** и **δ2**.

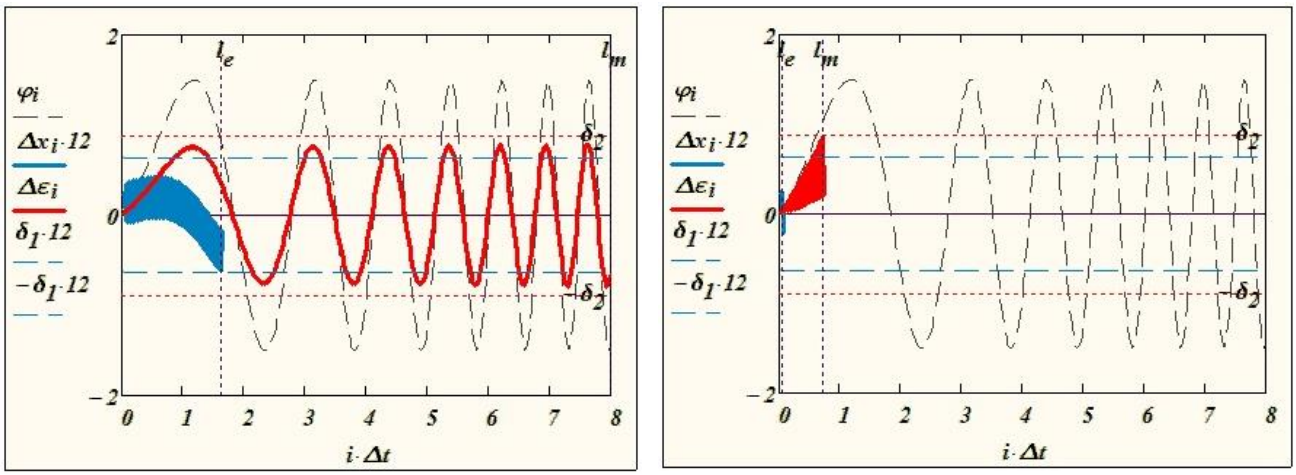


Рис. 10. Чрезмерное уменьшение параметра T_{ϕ} приводит к возбуждению системы, поскольку постоянная времени привода T_{ϕ} становится меньше периода кадров $T_{\phi} = 0,015 < \frac{1}{F_k} = 0,02$, и система теряет устойчивость. Дальнейшее уменьшение $T_{\phi} = 0,01$ приводит к срыву системы.

Заключение

Проведенное математическое моделирование позволяет оценивать ожидаемые динамические характеристики разрабатываемой системы. При этом можно выделить основные положения и параметры, максимально воздействующие на качество работы системы.

1. Динамические характеристики системы автосопровождения могут быть улучшены путём увеличения частоты ТВ-кадров, в частности, при этом существенно увеличивается допустимое угловое ускорение линии визирования ТВ-камеры. Однако при этом повышаются требования к быстродействию аппаратных средств, что может потребовать применения специализированной вычислительной архитектуры.

2. Повышение допустимого межкадрового сдвига $\boldsymbol{n}$ также приводит к увеличению предельно допустимого углового ускорения. При этом расширяется зона поиска, в которой вычисляются приращения координат, что, в свою очередь, ухудшает селективные свойства алгоритмов идентификации объектов. В этом случае может потребоваться изменение угла зрения объектива ТВ-системы и увеличение количества элементов разложения изображения.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании перспективных телевизионных систем автосопровождения.

Литература

1. Патент 155323 РФ, МПК B64C 13/18 (2006.01) B64D 43/00 (2006.01) Система управления беспилотным летательным аппаратом / Н. Н. Вилкова, В.И Шахрай, Э.П. Арзуманян; патентообладатель ЗАО «МНИТИ». – Приор. от 11.12.2014; опубл. 27.09.2015. Бюл. № 27. – 2 с.
2. Шахрай В.И., Арзуманян Э.П. Исследование методом математического моделирования одного способа подготовки эталона в корреляционных системах автосопровождения // Техника средств связи. Серия: Техника телевидения – М.: ЗАО «МНИТИ», 2016. – С. 42-53.
3. Первачев С.В. Радиоавтоматика: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1982. – 296 с., ил.

4. Арзуманян Э.П., Миколайчук Д.В. Принцип управления приводом ТВ-камеры в системах наблюдения и безопасности // Нелинейный мир. № 7. – М.: Издательство «Радиотехника», 2015. – С. 69-75.
5. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 1988. – 448 с.
6. Бабенко К.И. Основы численного анализа. Изд. 2-е, испр. и доп. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. – 848 с.

УДК 621.397.13

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

МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ

Рассматриваются вопросы распознавания оптических изображений с использованием методов спектральной селекции объектов на основе регистрации отражённого или излучённого потока в заданном спектральном участке с формированием m–сигналов разноспектральных изображений, отражающих «спектральный портрет» объектов.

Введение

Как известно искусственная нейронная сеть (ИНС) – математическая модель, а также её программное или аппаратное воплощение, отражает принцип организации и функционирования сетей нервных клеток живого организма [1, 2]. На сегодня накоплен достаточно богатый опыт построения таких систем для идентификации и распознавания объектов естественного или искусственного происхождения. Ниже рассматривается возможность использования основных принципов нейросетевой технологии для построения интеллектуальной спектрозональной системы распознавания заданных объектов окружающего пространства.

Основным источником информации для различения объектов при спектральной селекции оптических изображений (ОИ) являются спектрально-энергетические признаки (СЭП), пространственные признаки (ПП) и динамические признаки (ДП) объектов. Спектральная селекция ОИ базируется на анализе распределения интенсивности отражённого лучистого (светового) потока (сигналов изображений) объектов в различных спектральных участках (зонах) оптического спектра [3, 4]. Далее рассматриваются информационные и распознавательные возможности методов спектральной селекции объектов на основе анализа распределения их спектральных характеристик в некотором спектральном участке с длиной волны от λ_1 до $\Delta\lambda_n$.

Формализация процесса спектральной селекции объектов

Пусть наблюдаемые ОИ включают некоторое множество классов объектов

$$N=\{A,B,C,\ldots,W\}, \quad (1)$$

где каждый конкретный класс объектов *A, B, C, …, W* состоит из своего множества отдельных объектов

$$A=\{a_1,a_2,\ldots,a_i,\ldots,a_k\}$$

$$B=\{b_1,b_2,\ldots,b_i,\ldots,b_h\}$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots..$$

$$W=\{w_1,w_2,,w_i,\ldots,w_z\},$$

где *k, h, …, z* – число объектов для каждого класса $\{N\}$ в наблюдаемом пространстве.

При спектральной селекции, получение информации об объектах, осуществляется путём регистрации и преобразовании лучистого (светового) потока некоторого множества зон $\{M\}$

$$M=\{\Delta\lambda_1,\Delta\lambda_2,\ldots,\Delta\lambda_i,\ldots,\Delta\lambda_m\}, \quad (2)$$

где *m* – общее число зон регистрации лучистого (светового) потока.

Интенсивность отражённого (излучённого) лучистого потока от отдельных классов объектов некоторого множества $\{N\}$ в зонах регистрации $\{M\}$

характеризуется некоторым множеством спектрально-энергетических признаков $\{X(N)\}$

$$X(N)=\{X(A), X(B),\ldots, X(W)\}, \tag{3}$$

где каждый класс объектов включает своё множество спектрально-энергетических признаков (СЭП) по отдельным объектам

$$\begin{gathered} X(A)=\{X(a_1), X(a_2),\ldots, X(a_k)\} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ X(W)=\{X(w_1), X(w_2),\ldots, X(w_z)\}, \end{gathered} \tag{4}$$

а также каждый объект из $\{N\}$ для m-зон регистрации $\{M\}$ характеризуются множеством своих СЭП

$$\begin{gathered} X(a_1) =\{(x_{a1})_{\Delta\lambda 1}, (x_{a1})_{\Delta\lambda 2},\ldots,(x_{a1})_{\Delta\lambda i},\ldots, (x_{a1})_{\Delta\lambda m} \\ \ldots \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ X(a_k) =\{(x_{ak})_{\Delta\lambda 1}, (x_{ak})_{\Delta\lambda 2},\ldots,(x_{ak})_{\Delta\lambda i},\ldots, (x_{ak})_{\Delta\lambda m}\} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ X(w_z) =\{(x_{wz})_{\Delta\lambda 1}, (x_{wz})_{\Delta\lambda 2},\ldots,(x_{wz})_{\Delta\lambda i},\ldots, (x_{wz})_{\Delta\lambda m}\}. \end{gathered} \tag{5}$$

Для спектральной селекции объектов $\{N\}$, образующих признаки $0< X(a_1),X(a_2),\ldots,X(w_z)<p$ в зонах регистрации $\{M\}$, всегда существует некоторое число зон регистрации лучистого (светового) потока $1\leq m \leq V$, так что $X(a_1)\neq X(a_2),\ldots,X(a_1)\neq X(w_z)$.

Вначале следует доказать, что выражение $0<X(a_1),X(a_2),\ldots,X(w_z)<p$ справедливо для любого числа зон регистрации m из $\{M\}$. Значения признаков $X(a_1),X(a_2),\ldots,X(w_z)$ зависят и определяются зонами регистрации$\{M\}$ и представляют собой функцию от длины волны оптического спектра.

Как известно лучистый (световой) поток, отражённый от объектов, всегда положителен и ненулевой, что выражается равенством

$$0<F_{\text{отр}}(\lambda)_{x,y,z}=[\rho(\lambda)\cdot F_{\text{пад}}(\lambda)]_{x,y,z}<\infty, \tag{6}$$

где $F_{отр}(\lambda)$ и $F_{пад}(\lambda)$ – отражённый и падающий лучистый (световой) поток; $\rho(\lambda)$ – коэффициент отражения лучистого (светового) потока; x, y, z – пространственная область нахождения объекта.

В соответствии с (6) можно записать, что признаки $X(a_1),X(a_2),\ldots,X(w_z)$ также положительные и ненулевые, то есть

$$0< X(a_1),X(a_2),\ldots,X(w_z)<p,$$

где p – число, всегда меньшее бесконечности.

Неравенства признаков $X(a_1)\neq X(a_2),\ldots,X(a_1)\neq X(w_z)$ выполняются хотябы для одной зоны регистрации из $\{M\}$. Для доказательства этого, представим распределения значений признаков $X(a_1)$, $X(a_2),\ldots$, $X(w_z)$ в зонах регистрации $\{M\}$ по убывающей, возрастающей или переменно возрастающей и убывающей последовательности чисел вариационного ряда.

Для признаков $X(a_1)$, $X(a_2),\ldots$, $X(w_z)$, характеризующих объекты $\{N\}$ в зонах регистрации $\{M\}$ всегда может иметь место

$$\begin{array}{l} x(a_1)_{\Delta\lambda 1}< x(a_1)_{\Delta\lambda 2} <,\ldots,<x(a_1)_{\Delta\lambda i}<,\ldots,<x(a_1)_{\Delta\lambda m} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ x(a_k)_{\Delta\lambda 1}< x(a_k)_{\Delta\lambda 2} <,\ldots,<x(a_k)_{\Delta\lambda i}<,\ldots,=x(a_k)_{\Delta\lambda m} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots.. \\ x(b_h)_{\Delta\lambda 1}> x(b_h)_{\Delta\lambda 2} >,\ldots,>x(b_h)_{\Delta\lambda i}>,\ldots,>x(b_h)_{\Delta\lambda m} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ x(w_z)_{\Delta\lambda 1}< x(w_z)_{\Delta\lambda 2} >,\ldots,<x(w_z)_{\Delta\lambda i}<,\ldots,>x(w_z)_{\Delta\lambda m}. \end{array} \qquad (7)$$

В противном случае не существуют классы объектов $\{N\}$ или $\{A\},\{B\},\ldots,\{W\}$, а только отдельные объекты, либо a_1, либо a_2, …, либо w_z. Из выражения (7) следует, что всегда будет иметь конкретная зона регистрации $\Delta\lambda_1,\Delta\lambda_2,\ldots,\Delta\lambda_i,\ldots,\Delta\lambda_m$ для которой справедливо, что признаки удовлетворяют условию

$$x(a_1)_{\Delta\lambda i}\neq x(a_2)_{\Delta\lambda i},\ldots,x(a_i)_{\Delta\lambda i}\neq x(b_i)_{\Delta\lambda i},\ldots,x(c_1)_{\Delta\lambda i}\neq x(w_z)_{\Delta\lambda i}\,. \qquad (8)$$

В соответствии с этим существует также $\Delta\lambda_i$ – зона регистрации, так что

$$X(a_1)\neq X(a_2),\ldots,X(a_1)\neq X(b_h),\ldots,\ X(a_k)\neq X(w_z). \qquad (9)$$

Вследствие этого всегда имеется некоторое число зон регистрации m из $\{M\}$ для селекции всех объектов $\{N\}$. Согласно изложенному, при спектральной селекции объектов, возможно различение любого числа объектов между собой по СЭП в наблюдаемом пространстве. На практике эта возможность может ограничиваться рядом условий, которые принципиально могут быть успешно решены по мере совершенствования видео-информационных систем и технологий обработки сигналов [5, 6].

Спектральный портрет объектов

Особенности распределения спектрально-энергетических характеристик объектов в ультрафиолетовой (УФ), видимой (ВИ) и инфракрасной (ИК) областях спектра позволяет ввести термин «спектральный портрет» объектов для их известного множества [6]. Особенности подхода к определению спектрального портрета объектов (СПО) и его возможном применении при спектральной селекции и распознавании ОИ рассмотрены далее.

Использование некоторого числа зон регистрации лучистого (светового) потока $\Delta\lambda_1,\ldots,\Delta\lambda_i,\ldots,\Delta\lambda_m$ в выбранном спектральном участке от λ_1 до λ_n с формированием сигналов разноспектральных изображений, позволяет говорить о СПО. Он будет представлять собой распределение СЭП объектов в определённой области спектра.

Если принять, что имеется некоторое множество классов объектов $\{N\}$, включающих отдельные объекты и каждый объект $\{N\}$, подлежащий анализу – обнаружению, селекции и/или распознаванию имеет свою спектральную характеристику в спектральном участке длин волн от λ_1 до λ_n. То значение амплитуды сигналов разноспектральных изображений для отдельных точек изображения $[U(x, y)_{ji}]_{\Delta\lambda i}$ в целом будет характеризовать собой СПО, а их распределение по полю изображения будет формировать образ естественных или искусственных объектов, и при их визуальном восприятии – пространственный портрет объектов (ППО).

На рисунке 1, для примера, показан спектральный портрет двух классов объектов A и B с одинаковыми пространственными признаками в виде круга, при использовании регистрации лучистого потока в двух зонах $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$ и их преобразовании в сигналы разноспектральных изображений $U_c(t)$ с использованием спектрозональных систем.

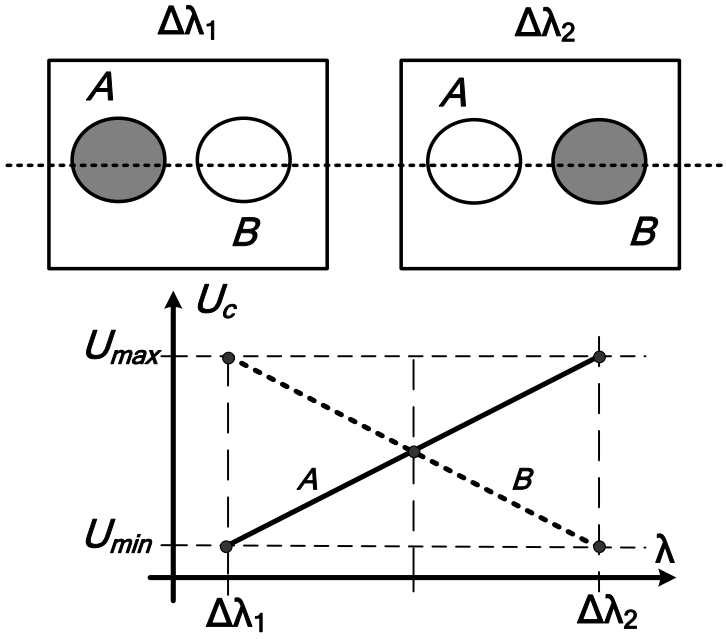


Рис. 1. Спектральный портрет двух объектов разных классов
с одинаковыми пространственными признаками.

Представленный СПО показывает ход спектрально-энергетических характеристик объектов класса *A* и *B* для двух зон регистрации лучистого потока $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$. Он отображает спектральный портрет со взаимными противоположными характеристиками, когда амплитуда сигнала для объекта класса *B* максимальна в первой зоне регистрации, со спадом ко второй зоне, а для объекта класса *A* наоборот, когда для первой зоны регистрации значение сигнала минимально, с возрастанием ко второй зоне регистрации, то есть

$$U_A(\Delta\lambda_1)_t<U_A(\Delta\lambda_2)_t \text{ и } U_B(\Delta\lambda_1)_t>U_B(\Delta\lambda_2)t. \qquad (10)$$

В целом, распределения значений сигналов для объектов в разноспектральных изображениях могут быть различными, при этом число зон регистрации может быть $m\geq 2$. В каждом случае, будет своё характерное распределение СЭП для объектов некоторого множества $\{N\}$. Различные классы объектов будут иметь свой ход спектральной характеристики в спектральном участке длин волн от λ_1 до λ_n.

Изменение СЭП и ПП во времени (суточные и сезонные вариации), относительно их первоначального состояния, будут характеризоваться некоторыми дополнительными информационными признаками, учитывающих состояние СПО и ППО во времени. При этом значение сигналов каждой точки изображения могут иметь свою определённую амплитуду $0\leq U_i(\Delta\lambda_i)\leq .1$. Всё

поле ТВ изображения, отображающее ППО, может быть охарактеризовано как двухградационное или многоградационное изображение [6] и т.д.

Введенное понятие СПО имеет своё важное практическое применение для решения задач обнаружения, селекции и распознавания многокомпонентных изображений, с формированием результирующих сигналов, предназначаемых для визуального или автоматического анализа изображений. Это определяется тем, что при большом числе зон регистрации лучистого потока СПО будет уникальной характеристикой объекта в спектральном участке с длиной волны от λ_1 до λ_n.

Структура модели интеллектуальной спектрозональной системы распознавания объектов

Следует отметить, что нейросетевые методы являются мощным инструментом для задач распознавания образов. Системы, использующие нейросетевые методы [1, 2], реализуют параллельную процедуру распознавания в Евклидовом пространстве описаний образов. В их основе лежат ИНС, работа которых состоит в преобразовании входного вектора в выходной вектор, причём это преобразование задаётся весами. Достоинства нейросетевых методов заключаются в возможности нелинейного разделения пространства образов и большой скорости вычислений, которая достигается благодаря параллельной организации структуры ИНС.

К недостаткам этих методов можно отнести то, что нейросети, как правило, являются специализированными системами, адаптированными для решения конкретной задачи. В рамках теории распознавания это означает, что ИНС обучается распознаванию конкретных классов образов. При добавлении новых классов объектов может потребоваться реорганизация структуры нейросети или, как минимум её повторное обучение. Также ИНС являются ресурсоёмкими системами.

В этой связи предлагается рассмотреть возможность использования спектральных признаков объектов, число которых, во-первых, имеет конечную величину для построения ИНС; во-вторых, каждый объект $\{N\}$ имеет свою спектральную характеристику, свойственную только данному объекту, как, например, отпечатки пальцев.

На рисунке 2 показана структура построения модели интеллектуальной спектрозональной системы для распознавания объектов и определения их

координат на основе технологии нейронной сети. Она включает m входных источников спектрозональных сигналов – 1, блок обработки спектрозональных сигналов – 2, решающее устройство – 3, блок определения координат объектов – 4, источник эталонных сигналов – 5.

Источником сигналов в данной модели являются m-сигналы разноспектральных изображений, формируемых с использованием спектрозональных систем [6], осуществляющих регистрацию лучистого потока в некотором множестве зон регистрации $\{M\}$.

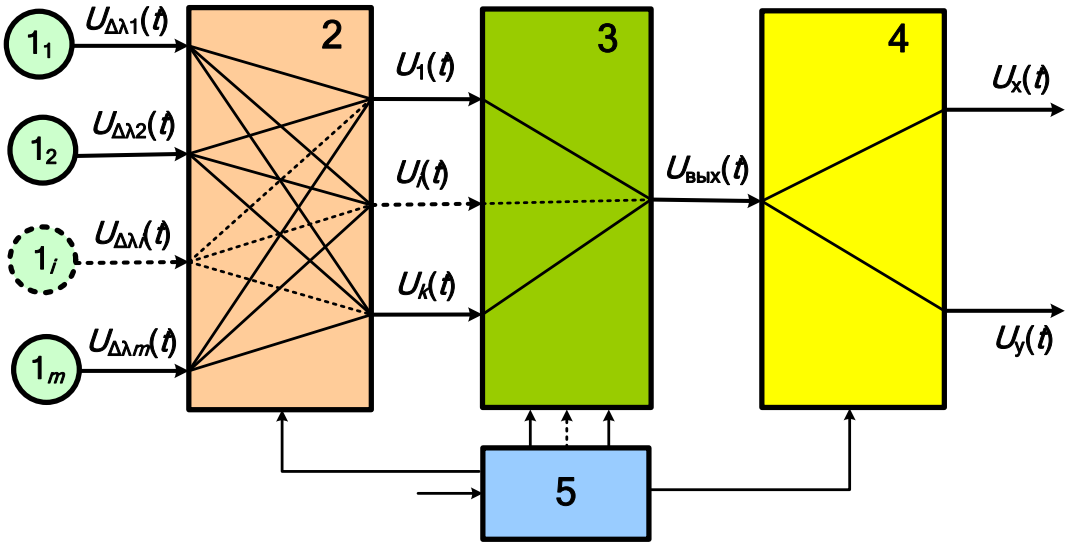


Рис. 2. Структура построения модели интеллектуальной спектрозональной системы для распознавания объектов и определения их координат на основе технологии нейронной сети.

Важной особенностью данной модели является то, что поэтапная обработка исходных m-сигналов разноспектральных изображений $\{U_i(t)\}$ по принятым алгоритмам в блоках 2, 3 и 4 приводит в конечном итоге к формированию двух сигналов, характеризующих координаты объектов.

На рисунке 3 показана структурная схема устройства для автоматического распознавания объектов и определения их координат на основе m-сигналов разноспектральных изображений с выборкой n-уровней в каждом сигнале.

Обозначения на схеме: аналого-цифровой преобразователь (АЦП) сигналов, блок выборки уровней сигнала (БВУС), многоканальный анализатор распределения уровня сигналов (МАРУС) (интеллектуальная система нейронной сети – ИСНС) в формируемых m-сигналах разноспектральных изображений, решающее устройство (РУ), блок измерения координат (БИК), блок управления (БУ), генератор тактовых импульсов (ГТИ).

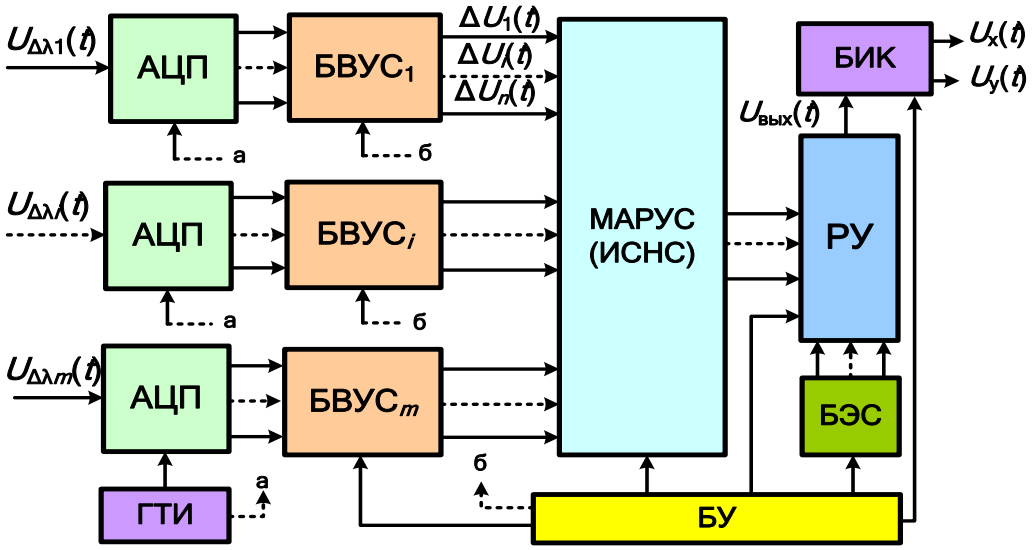


Рис. 3. Структурная схема устройства для автоматического распознавания объектов и определения их координат на основе *m*-сигналов разноспектральных изображений с выборкой *n*-уровней в каждом сигнале.

Схема работает следующим образом. Входные сигналы разноспектральных изображений $U_{\Delta\lambda 1}(t),\ldots,U_{\Delta\lambda i}(t),\ldots,U_{\Delta\lambda m}(t)$ поступают на входы своих АЦП, с выхода которых направляются на входы БВУС. Требуемые уровни выборки *m*-сигналов разноспектральных изображений в каждом БВУС задаются с БУ. Выбранные уровни сигнала, с каждого БВУС поступают для анализа в МАРУС (ИСНС), который работает по принятому алгоритму обработки и анализа уровней сигнала.

Далее сигналы с выхода МАРУС поступают на блок, в котором происходит принятие решения. На другие входы РУ подаются также эталонные сигналы. На выходе РУ формируется результирующий сигнал анализа нескольких разноспектральных изображений в виде сигнала о целевом объекте наблюдения. После чего этот сигнал поступает в БИК, на выходе которого формируются сигналы координат заданного объекта $U_x(t)$ и $U_y(t)$, которые далее могут быть использованы для управления другими объектами.

Заключение

В данной статье проведена формализация процесса спектральной селекции объектов и показана возможность их различения по спектрально-энергетическим признакам между собой для любого класса объектов $\{N\}$. Дано описание спектрального портрета объектов с использованием *m*-сигналов

разноспектральных изображений, формируемых с использованием спектрозональных систем, осуществляющих регистрацию лучистого потока в некотором множестве зон регистрации $\{M\}$. Представлена структура модели интеллектуальной спектрозональной системы распознавания объектов, а также схема устройства для автоматического распознавания объектов и определения их координат на основе *m*-сигналов разноспектральных изображений с выборкой *n*-уровней в каждом сигнале, формируемых в спектральном участке с длиной волны от λ_1 до $\Delta\lambda_n$.

Использование понятия СПО имеет своё важное значение для решения ряда практических задач обнаружения, селекции и распознавания объектов многокомпонентных изображений с формированием управляющих сигналов. Это связано с тем, что при некотором числе зон регистрации лучистого потока в выбранном спектральном участке УФ-, ВИ- и ИК-областей спектра СПО будет уникальной и достаточной информационной характеристикой для однозначного распознавания объектов некоторого $\{N\}$, с наперед задаваемой вероятностью.

Литература

1. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс / Пер. с англ. – М.: Вильямс, 2008. – 1103 с.
2. Потапов А.С. Теоретико-информационный подход к введению обратных связей в многоуровневых системах компьютерного зрения // Оптический журнал. Т. 74, № 10. – СПб., 2007. – С. 59-65.
3. Зубарев Ю.Б., Сагдуллаев Ю.С. Спектральная селекция оптических изображений. – Ташкент: Фан, 1987. – 108 с.
4. Сагдуллаев Т.Ю., Сагдуллаев Ю.С. Спектральная селекция и распознавание объектов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. Выпуск 2. – СПб., 2012. – С. 96-106.
5. Сагдуллаев Ю.С., Титов В.С., Дегтярев С.В. и др. Распознавание оптических изображений / Под общ. редакцией Ю. С. Сагдуллаева, В. С. Титова. – Ташкент, 2000. – 315 с.
6. Сагдуллаев Ю С., Ковин С.Д. Восприятие и анализ разноспектральных изображений. – М.: Спутник +, 2016. – 252 с.

УКД 621.397.13

Шавкунов О.В.

МАКЕТ СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ КАМЕРЫ

В статье рассмотрена разработка макета двухканальной спектрозональной телевизионной камеры, осуществляющей формирование трёх сигналов разно-спектральных изображений с использованием интегрально-дифференциального метода регистрации лучистого потока.

Введение

Особенностью спектрозональной телевизионной (ТВ) камеры является то, что она формирует три сигнала изображения за счёт регистрации лучистого потока с переменной шириной зоны в «широком» спектральном участке двумя матричными фотоприёмниками (МФП), которые охватывают видимую и ближнюю инфракрасную области спектра. Третий сигнал изображения получается за счёт совместной математической обработки двух сигналов – вычитанием сигналов между собой.

Увеличение числа каналов во входном звене спектрозональной ТВ камеры до шести позволяет сформировать дополнительно 57 сигналов разноспектральных изображений, внутри выбранного спектрального участка с длиной волны от λ_1 до λ_n. Использование такого метода формирования сигналов разноспектральных изображений позволяет уменьшить габаритно-весовые показатели спектрозональных ТВ камер.

Состав и описание принципа построения камеры

Представленный макет двухканальной телевизионной камеры, может стать прототипом для разработки перспективных многоканальных оптико-электронных систем, позволяющих решать широкий круг задач наблюдения и анализа объектов различных классов естественного и искусственного происхождения с учётом их суточных и сезонных изменений.

Главной задачей при разработке макета двухканальной спектрозональной ТВ камеры являлось нахождение кардинально нового способа получения более полной информации о зондируемом объекте со значительным уменьшением массогабаритных показателей камеры, повышением надежности и уменьшением времени на обнаружение и распознавание объектов.

За основу был взят способ, описанный в патенте [1]. В качестве наиболее близкого решения был выбран патент [2]. Основываясь на этом решении, была предложена новая принципиальная оптическая схема (Рисунок 1)

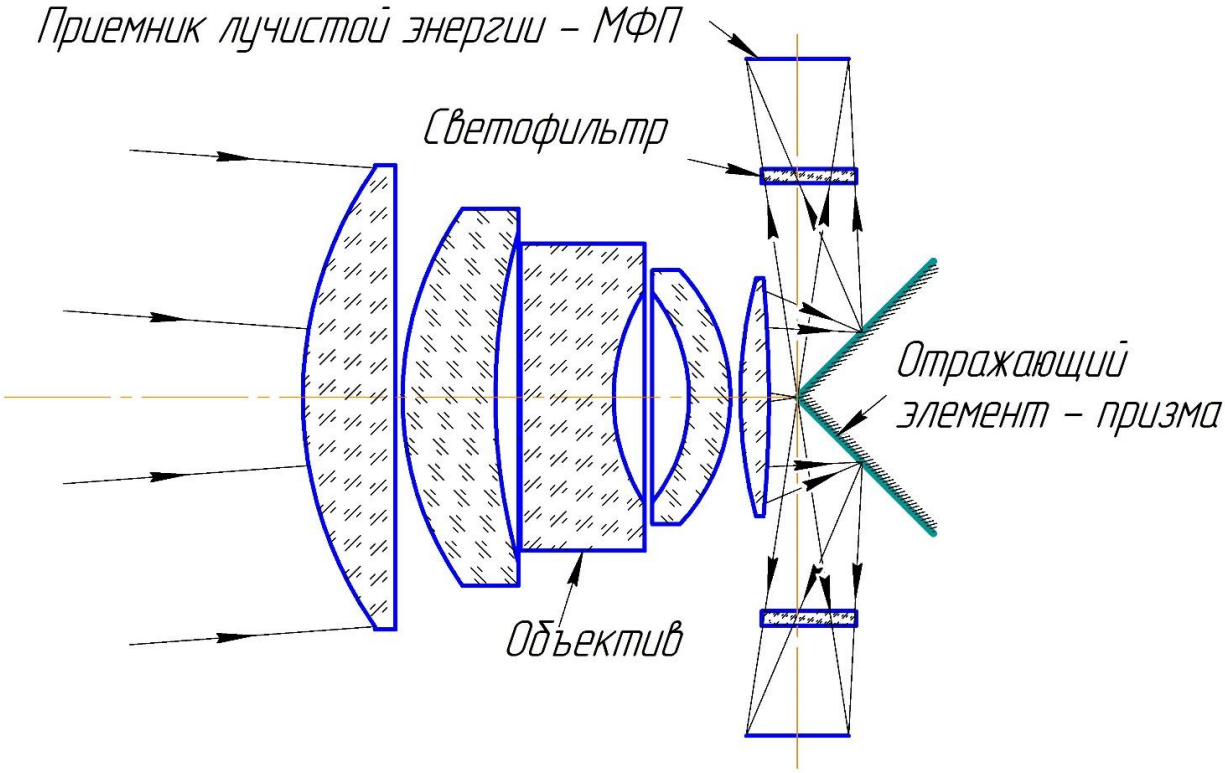


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема.

Здесь поток лучистой энергии от анализируемого объекта попадает во входной зрачок объектива и посредством него фокусируется на приёмниках лучистой энергии (МФП). Перед тем как попасть на МФП, поток геометрически разбивается на два одинаковых потока имеющих форму половины окружности за счёт призмы. Затем каждый из двух полученных потоков проходит через свой светофильтр и фокусируется на МФП.

После определения оптической схемы макета и согласования схемы деления, осуществлялся выбор и расчёт составляющих узлов и элементов спектрозональной ТВ камеры.

Выбор и расчёт делителя светового потока

В качестве делителя светового потока была выбрана равнобедренная призма с двумя внешними отражающими поверхностями (Рисунок 2). Конструктивные параметры расчитывались путём построения геометрического

хода лучей через предшествующие ей оптические элементы, опираясь на ранее разработанный метод расчёта [4] .

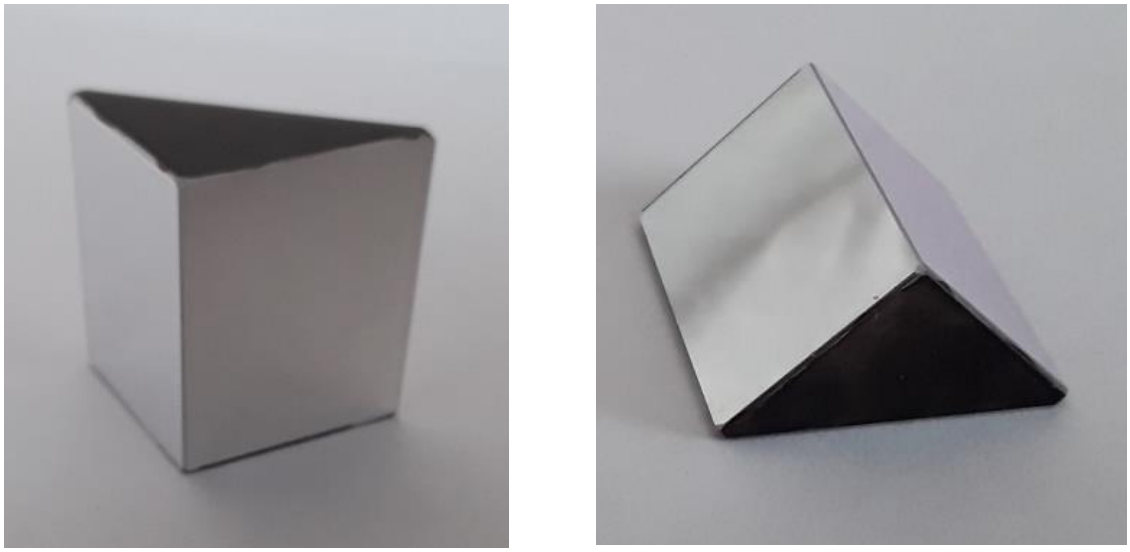


Рис. 2. Внешний вид призмы – светоделителя.

Выбор и расчёт объектива

Для макета двухканальной ТВ камеры был выбран серийный объектив ОКС 6-75-1. Анализ аберраций данного объектива в программе Zemax доказывает, что он обладает достаточным качеством изображения в широком спектральном диапазоне для работы совместно с выбранным МФП.

Помимо этого, был произведен расчёт в программе Zemax объектива, параметры которого могут максимально раскрыть возможности разрабатываемой спектрозональной телевизионной камеры.

Выбор и расчёт приёмника лучистой энергии

Исходя из общего спектрального диапазона работы макета были выбраны камеры фирмы Basler aVA 1900 – 50gm с рабочим диапазоном, представленным на рисунке 3. Помимо этого был произведен энергетический расчёт, подтвердивший целесообразность использования камеры с данным МФП, изготовленным по технологии ПЗС.

Так как на первом этапе была поставлена цель создания макетного образца, приёмник намеренно был выбран в корпусе компании производителя (сам приёмник спозиционирован относительно посадочных поверхностей корпуса и имеет достаточное количество крепёжных элементов) для дальнейшего упрощения и удешевления процесса конструирования корпуса

самого макета с большим количеством подвижек, необходимых для юстировки всех оптических элементов относительно друг друга.

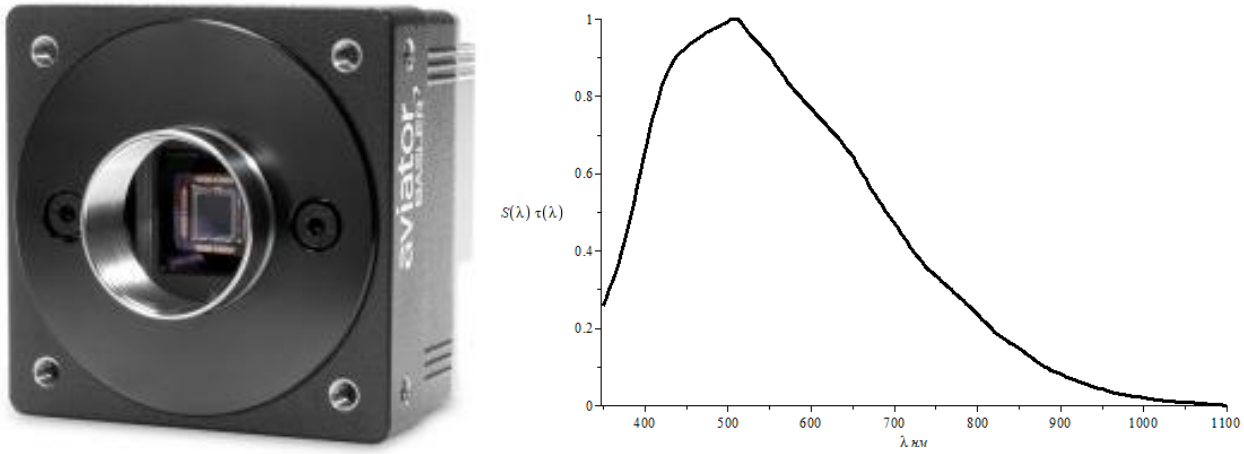


Рис. 3. Камера Basler aVA 1900 – 50gm и спектральная характеристика МФП.

Выбор типа светофильтров

Для дальнейшей отработки методов спектральной селекции объектов многокомпонентных изображений были выбраны светофильтры со спектрами пропускания (Рисунок 3) 300-450 (а), 300-600 (б), 350-750 (в) и одна подложка с полным спектром пропускания. Габариты определялись геометрическим построением хода лучей через все оптические компоненты.

а) б) в)

Рис. 3. Внешний вид используемых светофильтров.

Заключение

В результате выполненных работ был создан действующий макет спектрозональной ТВ камеры. Данный макет позволяет:

- формировать дополнительный сигнал разноспектрального изображения при меньшем числе входных оптических каналов;
- уменьшить число используемых матричных фотоприёмников для преобразования входного лучистого потока;
- уменьшить габаритно-весовые характеристики спектрозональной ТВ камеры;
- повысить надежность, благодаря отсутствию подвижных сканирующих элементов и уменьшению общего числа элементов камеры и др.;
- исключить эффект параллакса, присущий всем многоспектральным камерам, имеющим два и более объективов и др.

Примененные при разработке новые технические решения позволили значительно уменьшить габариты и массу камеры, т.к. используется только один объектив и всего два МФП. Использование третьего сигнала изображения даёт возможность регистрации быстроменяющихся сюжетов, что повышает вероятность более быстрого обнаружения и распознавания объектов, а также увеличивает дальность обнаружения и распознавания объектов.

Возможность оперативной замены светофильтров, непосредственно подбираемых под объект селекции и анализа, сделала макет спектрозональной ТВ камеры универсальным для лабораторных исследований.

Литература

1. Патент РФ № 2604898. Способ формирования спектрозональных видеосигналов / Ковин С.Д., Сагдуллаев Ю.С. – Опубл. 20.12.2016. Бюл. № 35.
2. Multi-spectral image capturing apparatus and adapter lens: pat. 2006/0279647 US / Wada T., Komiyaa Y., Ajito T. field 24.08.2006; publ. 14.12.2006.
3. Алимов А.Е., Шавкунов О.В., Сагдулаев Ю.С., Ковин С.Д. Спектрозональная телевизионная камера // Техника средств связи. Серия: Техника телевидения. – М.: ЗАО «МНИТИ», 2017. – С. 104-111.
4. Алимов А.Е., Шавкунов О.В. Оптимизация параметров цветодилительной системы для использования со светосильными объективами // Техника средств связи. Серия: Техника телевидения. – М.: ЗАО «МНИТИ», 2017. – С. 94-102.

5. Сагдуллаев Ю.С., Ковин С.Д., Попов А.В., Шавкунов О.В. К вопросу распознавания объектов по спектральным признакам // Вопросы радиоэлектроники, серия: Техника телевидения. Выпуск 4. – СПб.: 2017. – С. 44-50.

УДК 621.397.13

Сагдуллаев В. Ю.

ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ МНОГОРАКУРСНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Рассмотрены особенности построения систем многоракурсного телевидения и выбора спектральных участков для регистрации лучистого потока. Показаны возможные подходы к передаче видеосигналов в меньшей полосе частот канала связи.

Введение

Вещательное чёрно-белое телевидение прекратило своё существование во многих странах мирах к началу 60–70-х годов XX столетия. Оно перешло на цветное телевидение, но не в военной области, в частности, в системах телевидения для авиации. Однако, в последние годы наметилась тенденция начала использования систем цветного телевидения и в военной авиации [1]. Переход к цветному телевидению был обусловлен тем, что при формировании цветного телевизионного (ТВ) изображения наиболее полно учитываются специфические особенности зрительного восприятия оптических изображений человеком [2]. Поэтому, по мере разработки и развития технологий, был осуществлён переход к цветному телевидению, а в ближайшей перспективе планируется переход и к объёмному телевидению.

Целесообразность перехода к разноспектральным системам обусловлена тем, что при формировании «цветного» изображения наиболее полно можно учитывать как спектральные особенности излучения объекта (цели), так и специфические особенности зрительного восприятия оптических изображений человеком. Все эти изменения должны в полной мере коснуться и систем

телевидения в военной сфере, где главным звеном и потребителем видеоинформации остаётся человек.

Обеспечение полётов летательных аппаратов, в том числе и беспилотных летательных аппаратов (БЛА), предусматривает размещение в их составе специализированных оптико-электронных визирных систем для решения различных задач обзора и дистанционной разведки подстилающей поверхности Земли. Среди той аппаратуры, которая используется для указанных целей в военной авиации, имеют перспективу своего применения, так называемые системы многоракурсного телевидения [3, 4]. Принцип действия таких систем включает использование нескольких ТВ или тепловизионных (ТПВ) камер, которые располагаются в одной «точке» (месте, объекте) для одновременного кругового обзора объектов окружающего пространства (в 360^0). Они могут устанавливаться на БЛА, стационарных и мобильных средствах контроля:

- территорий массового присутствия (скопления) людей – аэропортов, вокзалов, метро, стадионов, торговых центров и т.д.;
- предприятий с потенциально опасными веществами и материалами, имеющих взрывоопасные арсеналы;
- офисов банковских структур, при доставке и перевозке денежных средств и других материальных ценностей;
- предприятий золотодобывающей и алмазной промышленности;
- городских и магистральных трасс с интенсивным трафиком движения транспортных средств;
- отдельных участков земного, водного и воздушного пространства, пожароопасных лесных массивов и др.

Учитывая актуальность их практического применения, ниже рассматриваются особенности построения таких систем: выбора структуры построения многоракурсных передающих камер, определения количества используемых датчиков сигналов изображений и их расположения в камерах, а также выбора спектральных участков (зон) регистрации лучистого (светового) потока, подходы к передаче видеосигналов систем многоракурсного телевидения (МТВ) по каналам связи и др.

Многоракурсная передающая камера

В состав систем МТВ входит передающая камера, которая содержит некоторое число синхронных ТВ датчиков, формирующих сигналы изображения соответствующего ракурса наблюдения. На рисунке 1 показан один из вариантов расположения датчиков сигналов изображения (ДСИ) в многоракурсной передающей камере [5].

Величина R – внешний радиус круговой поверхности, где располагаются датчики. При угле наклона плоскости расположения ДСИ относительно горизонтали, равного величине ε = 0, осуществляется круговой обзор пространства (360^0) в горизонтальной плоскости «слева–направо», а при угле ε = 90^0 осуществляется круговой обзор пространства (360^0) в вертикальной плоскости «снизу–вверх». В многоракурсной передающей ТВ камере для одновременного кругового обзора окружающего пространства число ДСИ (формируемых видеосигналов) может быть равно величине

$$N = 360^0/\varphi, \qquad (1)$$

где φ – угол обзора отдельного датчика.

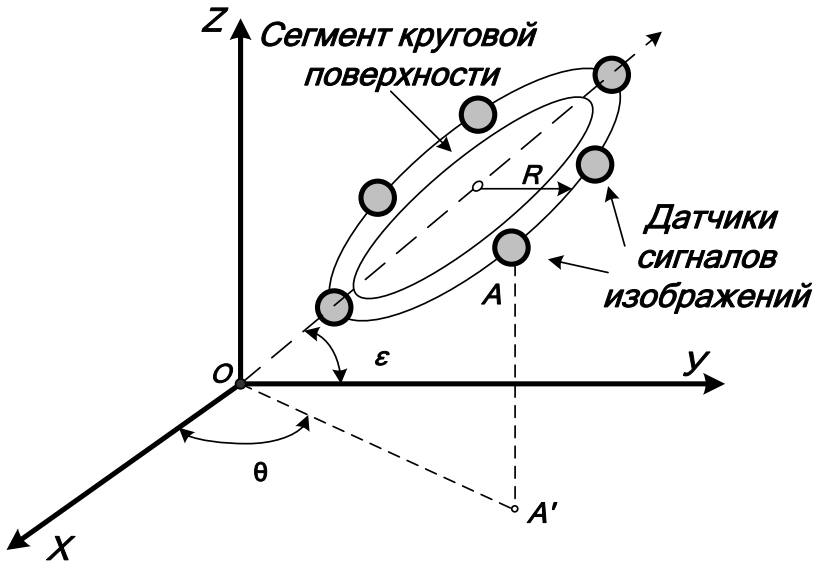


Рис. 1. Принцип расположения ТВ датчиков в многоракурсной камере.

ДСИ могут располагаться на некоторой одиночной плоскости P (например, в виде круга, квадрата и т.д.) или на нескольких параллельных плоскостях, относительно друг друга, или с различными значениями угла ε для каждой

плоскости их расположения. Тогда общее число ДСИ может составить величину

$$N_{\text{общ}} = N_1 + N_2 + \ldots\ldots + N_i + \ldots\ldots + N_{\text{h}}, \qquad (2)$$

где N_1 – число ДСИ в i–плоскости, h – общее число плоскостей.

Число ДСИ на отдельной плоскости (ярусе) может быть неодинаковым, при этом нижний и верхний ярус могут иметь всего по одному датчику, которые формируют изображения одного ракурса наблюдения «сверху–вниз» или «снизу–вверх» и др.

Выбор спектральных участков (зон) регистрации лучистого (светового) потока для передающих камер

В задачах многоракурсного видеонаблюдения объектов и адаптации ТВ систем к заданному круговому пространству фокусное расстояние объективов ТВ датчиков, а также их разрешающая способность на местности или в пространстве могут быть одинаковыми или разными для отдельного ракурса.

Реализация систем МТВ для кругового (панорамного) обзора позволит увеличить информативность формируемых изображений за счёт увеличения числа ракурсов и учёта возможных текущих вариаций пространственных и спектральных признаков объектов по каждому ракурсу наблюдаемого пространства. Системы МТВ могут формировать двумерные или объёмные изображения, которые можно представить для всех или отдельных ракурсов в виде чёрно-белых, цветных или спектрозональных изображений (Рисунок 2). Такие системы могут осуществлять регистрацию лучистого (светового) потока в ультрафиолетовой (УФ), видимой (ВИ) и инфракрасной (ИК) областях спектра [5].

С учётом этого, в таблице 1 показаны возможные спектральные участки оптического спектра (или отдельные зоны внутри этих участков), которые могут быть использованы при построении систем МТВ.

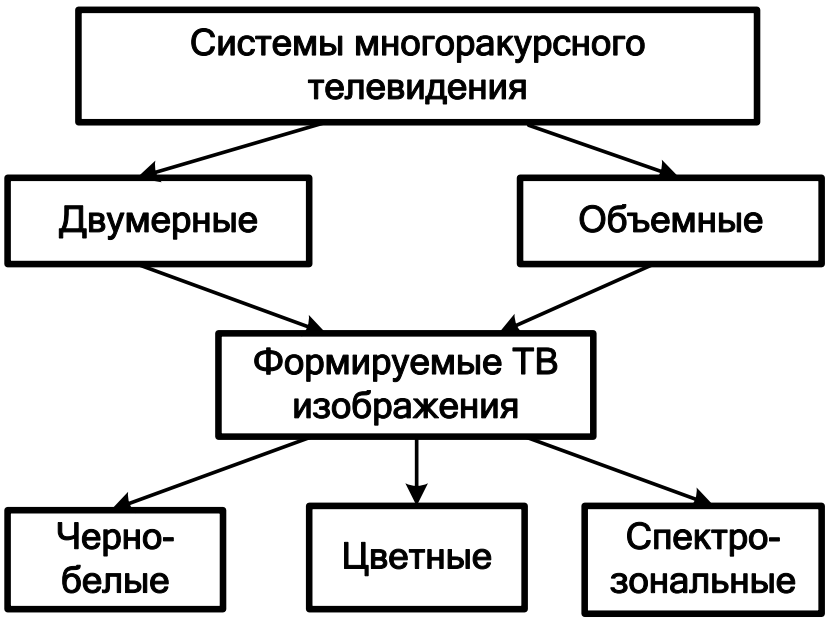


Рис. 2. Классификация систем многоракурсного телевидения.

Таблица 1. Спектральные участки для регистрации лучистого потока.

№ *n/n*	**Изображения всех или отдельно взятых ракурсов**	**Участки оптического спектра (мкм)**			
		УФ < 0,38	ВИ 0,38–0,76	ИК ≤ 2,5	ИК > 2,5
Согласованы со спектральной характеристикой зрительной системы					
1.	Чёрно-белые	–	+	–	–
2.	Цветные	–	+	–	–
Не согласованы со спектральной характеристикой зрительной системы					
3.	Чёрно-белые	+	–	+	+
4.	Спектрозональные	+	+	+	+

Для случая, когда выбранные участки оптического спектра не согласованы со спектральной характеристикой зрительной системы человека (п. 3, 4), формирование многоракурсных ТВ изображений [4] всех или отдельных ракурсов может осуществляться путём регистрации лучистого потока:

- в отдельной широкой области спектра, включающей или УФ или ВИ или ИК участок;
- в одной или нескольких зонах внутри отдельной области (УФ, ВИ, ИК) или внутри прилегающих областей спектра, например, вида (УФ+ВИ), (ВИ + ИК) и т.д.

При формировании двумерных многоракурсных ТВ изображений кругового обзора число ТВ датчиков составит величину $N=360^0/\varphi$, где φ – угол обзора отдельного ТВ датчика.

В зависимости от используемого спектрального участка для регистрации лучистого потока, системы МТВ можно разделить на отдельные группы, которые формируют изображения по каждому ракурсу в одинаковых или разных спектральных участках, согласованные или не согласованные со зрительной системой человека. Далее, они различаются как системы, регистрирующие отражённый или излученный лучистый поток, формирующие чёрно-белые, цветные, спектрозональные и в том числе тепловые ИК изображения.

Формирование объёмных многоракурсных изображений кругового обзора может потребовать увеличение числа ДСИ в два раза

$$N_{\text{общ}} = 2 \cdot N = N_{\text{л}} + N_{\text{п}}, \qquad (3)$$

где $N_{\text{л}}$, $N_{\text{п}}$ – число ДСИ для левой и правой стереопары передающей камеры объёмной системы МТВ.

В другом случае, в передающей камере два соседних ДСИ могут быть использованы для формирования сигналов левой и правой стереопар. Тогда число формируемых ракурсов кругового обзора уменьшится в два раза и составит величину $N/2$. Могут быть и другие комбинации формирования сигналов. Например, когда в передающей камере, датчики левой стереопары будут осуществлять регистрацию отражённого светового потока в ВИ области спектра, а датчики правой стереопары будут регистрировать излучённый лучистый поток в ИК области спектра с длиной волны, например, $\lambda > 2{,}5$ мкм.

Такая комбинация регистрации отражённого светового потока в ВИ области спектра и регистрации излучённого лучистого потока (например, в средней области ИК спектра) позволит использовать изображения левой стереопары для видеонаблюдения объектов в дневное время, а тепловые изображения правой стереопары для их видеонаблюдения в ночное время.

Передача видеосигналов в системах многоракурсного телевидения

На рисунке 3 приведена общая структурная схема систем МТВ. Она включает: многоракурсную передающую камеру (МПК), блок обработки и передачи m – видеосигналов, канал связи, блок приёма m – видеосигналов и блок отображения видеосигналов N – ракурсов [3, 5]. Для систем МТВ требуется расширение полосы частот канала связи пропорционально увеличению числа ракурсов или ДСИ, поскольку число формируемых видеосигналов в МПК равно их числу. Поэтому исследование методов передачи m–видеосигналов и нахождение практических решений по данному вопросу является актуальной задачей при внедрении систем МТВ с большим числом ракурсов. Необходимая полоса частот канала связи будет равна величине $\Delta F = m \cdot \Delta f$, где Δf – полоса частот необходимая для передачи одного видеосигнала. В таблице 2 показана требуемая исходная скорость передачи видеосигналов систем МТВ в цифровой форме (при значениях частоты дискретизации $f_д$ = 13,5 МГц и k=8) в зависимости от числа ракурсов. В качестве формируемых изображений здесь приняты чёрно-белые и цветные ТВ изображения.

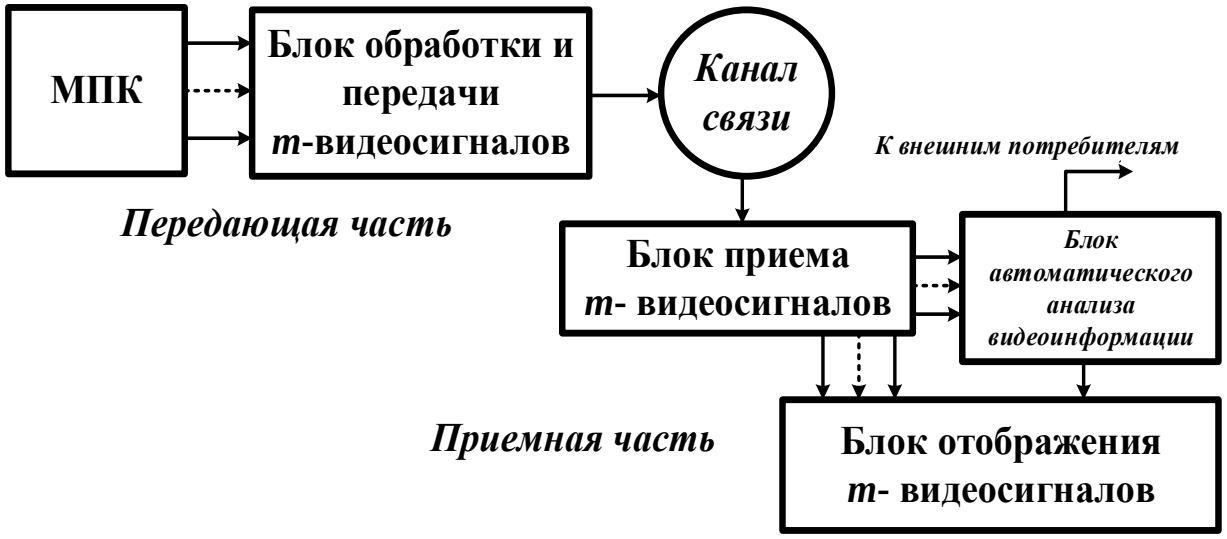


Рис. 3. Общая структурная схема систем многоракурсного телевидения.

При формировании двумерных чёрно-белых (чб) или цветных (цв) ТВ изображений скорость передачи видеосигналов в цифровой форме составит величину [2, 4]

$$C_{чб} = N \cdot 108, \quad C_{цв} = N \cdot 216, \quad (\text{Мбит/с}). \qquad (4)$$

Для одновременной передачи видеосигналов, формируемых с использованием систем МТВ, увеличение числа ракурсов (видеосигналов) N требует наличия более широкополосных каналов связи.

Таблица 2. Требуемая исходная скорость передачи видеосигналов в цифровой форме.

Число ракурсов наблюдения	**Формируемые многоракурсные ТВ изображения**	
	Чёрно-белые	Цветные
	Исходная скорость передачи видеосигналов без сжатия (Мбит/с)	
1	108	216
5	540	1080
N	$N \cdot 108$	$N \cdot 216$

В таблице 3 показаны возможные способы передачи видеосигналов для изображений отдельных ракурсов (чёрно-белых и цветных), а также необходимую скорость их передачи в цифровой форме при наличии или отсутствии сжатия видеоинформации, объединения нескольких исходных видеосигналов в один результирующий видеосигнал.

Таблица 3. Способы передачи видеосигналов в цифровой форме и значения их скорости.

Изображение отдельного ракурса	**Способы передачи N –видеосигналов**	**Скорость передачи N–видеосигналов, Мбит/с**
Чёрно-белое	Последовательный, без сжатия	108
Цветное		216
Чёрно-белое	Одновременный, без сжатия	$N \cdot 108$
Цветное		$N \cdot 216$
Чёрно-белое	Последовательный, со сжатием	$108/A_1$
Цветное		$216/A_2$
Чёрно-белое	Одновременный, со сжатием	$N \cdot 108/A_1$
Цветное		$N \cdot 216/A_2$
Чёрно-белое	Одновременный, без сжатия и с объединением	$N \cdot 108/D_1$
Цветное		$N \cdot 216/D_2$
Чёрно-белое	Одновременный, со сжатием и с объединением	$N \cdot 108/A_1 \cdot D_1$
Цветное		$N \cdot 216/A_2 \cdot D_2$

Используя выражение (4), можно определить необходимую скорость (в Мбит/с) для одновременной передачи видеосигналов N ракурсов в чёрно-белом и цветном варианте при использовании операций сжатия видеоинформации

$$C_{\text{чб}} = (N \cdot 108)/A_1, \quad C_{\text{цв}} = (N \cdot 216)/A_2, \tag{5}$$

где A_1 и A_2 – коэффициенты, учитывающие степень сжатия видеоинформации, представленной в чёрно-белом и цветном вариантах.

Используя выражение (5) можно определить необходимую скорость для одновременной передачи видеосигналов N ракурсов в чёрно-белом и цветном вариантах при использовании операций сжатия видеоинформации и объединения нескольких видеосигналов в один результирующий (до их сжатия или после сжатия) в виде

$$C_{\text{чб}} = (N \cdot 108)/A_1 \cdot D_1, \; C_{\text{цв}} = (N \cdot 216)/A_1 \cdot D_2 \;\; (\text{Мбит/с}), \tag{6}$$

где D_1 и D_2 – коэффициенты, учитывающие степень объединения нескольких m–видеосигнало*в* чёрно-белых и цветных изображений в один результирующий видеосигнал.

Передача большого числа видеосигналов систем МТВ требует использования эффективных алгоритмов сжатия видеоинформации (например, типа *MPEG*-4 или более совершенных, *H*.265), которые бы сохраняли заданное качество изображений отдельного ракурса в чёрно-белом или цветном варианте при больших коэффициентах сжатия видеоинформации.

Заключение

Рассмотренные системы МТВ предназначены для решения специализированных задач видеонаблюдения объектов кругового пространства (x, y, z). При их использовании это может быть обнаружение, селекция или различение объектов, наделённых определёнными признаками или анализ объектов для последующего распознавания содержания оптических изображений. Рассмотренные варианты выбора спектральных участков (зон) регистрации лучистого (светового) потока для систем МТВ, а также те или иные сочетания используемых спектральных участков позволяют формировать чёрно-белые, цветные и спектрозональные изображения, которые могут быть двумерными или объёмными по соседним ракурсам наблюдения.

В соответствии с выражениями (5) и (6) для сохранения скорости передачи *m*–видеосигналов как для одного видеосигнала или для её уменьшения, необходимо обеспечить сжатие видеоинформации с коэффициентом равным или большим, чем число используемых ракурсов $A \geq N$, или осуществить первоначальное объединение видеосигналов N с коэффициентом D, которое бы приводило к выполнению условия $D \geq N$. Тогда, при совместном использовании операций первоначального объединения сигналов, с последующим их сжатием (или первоначального сжатия с последующим объединением) обеспечит выполнение условия $A \cdot D >> N$. Всё это, в конечном итоге, позволит осуществить передачу *m*–видеосигналов систем МТВ в меньшей полосе частот канала связи.

Реализация разноспектральных систем МТВ найдёт должное применение в мобильных средствах технического зрения. Они будут востребованы при решении широкого класса обзорно-поисковых и разведывательных задач с использованием БЛА, а также самолётов военной авиации для оперативного контроля состояния объектов земной и водной поверхности.

Литература

1. Зарубежные авиационные обзорно-поисковые, прицельные и пилотажные оптико-электронные системы (Аналитический обзор по материалам зарубежных информационных источников). Составители: И.М. Устенко, В.И. Шутов / Под общей редакцией академика РАН Е.А. Федосова. Научно-информационный центр ГосНИИАС. – М., 2012. – 100 с.
2. Телевидение: Учебник для вузов / В.Е. Джакония, А.А. Гоголь, Я.В. Друзин и др. / Под ред. В. Е. Джаконии. – М.: Радио и связь, 2000. – 640 с.
3. Патент РФ № 22413386. Система многоракурсного телевидения / Вилкова Н.Н., Зубарев Ю.Б., Сагдуллаев Ю.С. – Приоритет от 04.06.2009; опубл. 27.02.2011. Бюл. № 6.
4. Дзягун Д.Ю., Куценко Н.Н. Видеосистема кругового обзора на основе сшивки изображений в реальном времени / Вопросы оборонной техники. Серия 9. Специальные системы управления, следящие приводы и их элементы. Выпуск 1 (246) - 2(247). – М., 2011. – С. 110-114.
5. Ковин С.Д., Сагдуллаев В. Ю., Сагдуллаев Ю. С. Системы много-ракурсного телевидения. – М.: Спутник +, 2014. – 184 с.

УДК 621.397.13

Толочков Д.В., к.т.н.

ТЕПЛОВИЗИОННАЯ СИСТЕМА КРУГОВОГО ОБЗОРА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ

Рассмотрен принцип построения тепловизионной системы кругового обзора для обнаружения высокоскоростных малоразмерных воздушных целей. Исследуется система двухконтурного привода, позволяющая сократить время формирования панорамного кадра и повысить быстродействие системы.

В задачах оперативного контроля пространства вокруг объекта охраны, необходимо обнаруживать мало~~раз~~мерные цели с широким диапазоном скоростей. Это могут быть как небольшие беспилотные летательные аппараты (БПЛА), летящие со скоростью до 20 м/с, так и высокоскоростные авиационные и наземные средства поражения со скоростью 140 м/с и выше.

Активные средства локации имеют ряд недостатков и существенных ограничений:

- активное излучение является демаскирующим признаком;
- применение активных средств локации затруднено или запрещено в условиях жилой застройки, требует согласование частотного диапазона в гражданском секторе применения;
- локационные станции радиодиапазона имеют ограничения по минимальным геометрическим размерам цели, минимальным скоростям и высоте полёта цели и др.

Пассивные средства локации в инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн лишены перечисленных недостатков. Они способны фиксировать тепловое излучение от цели, что является устойчивым обнаружительным признаком.

К данному классу приборов относятся инфракрасные (ИК) обзорные системы «смотрящего» типа [1, 2], имеющие один механический контур управления (Рисунок 1), состоящий из приводов по азимуту (п1) и углу места (п2).

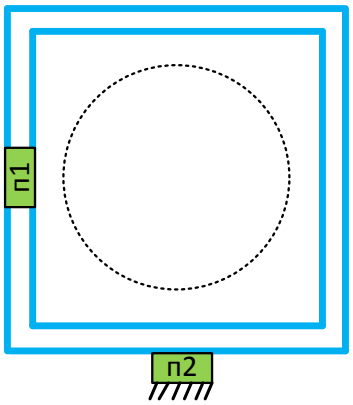


Рис. 1. Одноконтурная система кругового обзора.

Таблица 1. Технические параметры одноконтурной системы кругового обзора с охлаждаемым ИК-приёмником излучения.

№	Начальные условия	Значение	
1	Угол захвата по азимуту, градус по углу места, градус	360 60	
2	Мгновенное поле зрения, мрад	0,5	0,25
3	Число элементов в МФП, пиксель	640×480	
4	Время накопления, мкс	100	
	Расчётные параметры		
5	Угловое поле зрения, градус	18	9
6	Время формирования панорамного кадра, с	4,3	16,6

Современные инфракрасные матричные фотоприёмники (МФП) даже с активным охлаждением имеют время накопления не менее 100 мкс, что приводит к значительному времени формирования панорамного изображения наблюдаемого пространства. В таблице 1 приведены расчётные значения времени формирования панорамного изображения для одноконтурной системы кругового обзора.

Из таблицы 1 видно, что время формирования панорамного кадра систем кругового обзора с одним механическим контуром управления значительно и растёт по мере увеличения разрешающей способности. Скоростная цель за такое время способна целиком преодолеть зону ответственности системы кругового обзора. Таким образом, система кругового обзора с одним

механическим контуром не всегда способна обеспечить требуемое быстродействие для обнаружения и сопровождения скоростной цели.

Указанная трудность может быть устранена ИК-системой кругового обзора с двухконтурной механической системой управления [2]. При этом используемый МФП может быть как охлаждаемым – для среднего ИК-диапазона волн (InSb, CdxHg(1-x)Te), так и неохлаждаемым – микро-болометрическим.

Двухконтурная система состоит из двух механических контуров управления – внутреннего и внешнего (Рисунок 2). Внутренний контур обозначен красным цветом и имеет привод только по азимуту (п1). На нём закрепляется оптическая система и матричный приёмник излучения. Внешний контур показан синим цветом и имеет два привода – по азимуту (п3) и углу места (п2).

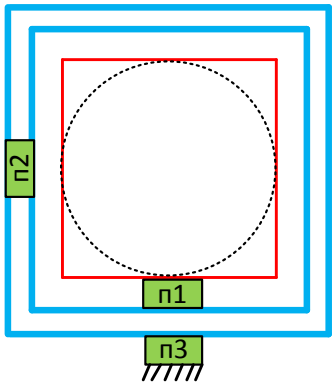


Рис. 2. Двухконтурная система кругового обзора.

Внешний контур совершает непрерывное вращение с заданной угловой скоростью, обеспечивая обзор пространства по азимуту и углу места.

Внутренний контур попеременно движется в направлении движения внешнего контура, догоняя его, либо против движения в режиме стабилизации, когда происходит компенсация вращения внешним контуром (Рисунок 3). Таким образом, образуются промежутки времени, когда внутренний контур находится в режиме стабилизации и не происходит смаза изображения.

Для исследования возможностей по быстродействию двухконтурной системы кругового обзора необходимо задаться мгновенным полем зрения системы u и углом обзора по углу места $a_м$.

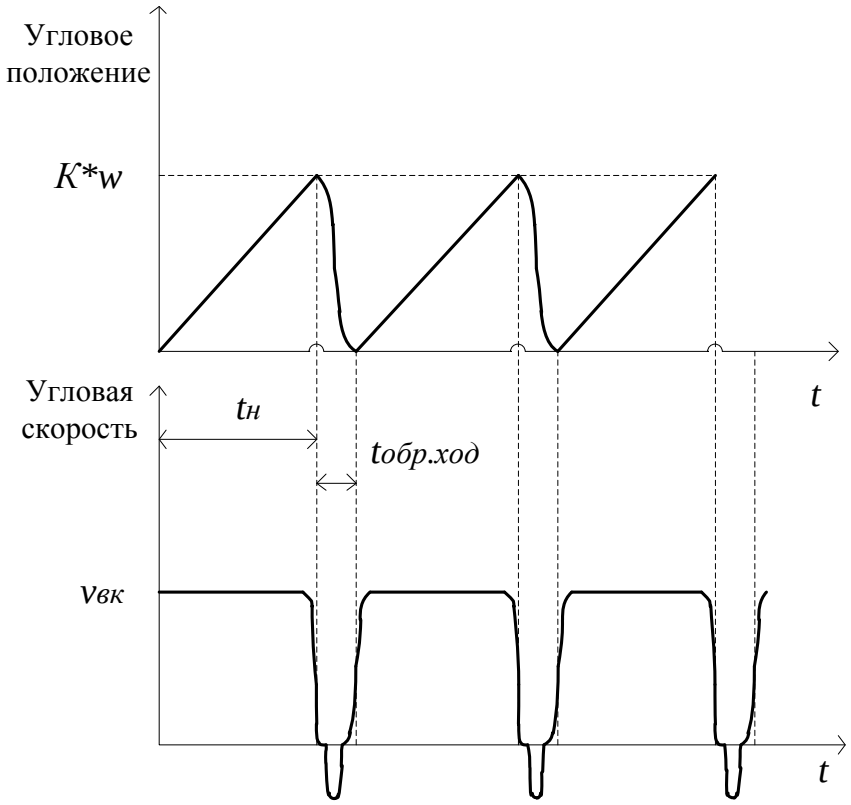


Рис. 3. Временная диаграмма работы внутреннего контура.

Если количество пикселов в строке МФП принять равным N, то угловое поле зрения ИК-канала w составит

$$w = u \cdot N. \tag{1}$$

Количество зон, которые необходимо фиксировать при обзоре по азимуту, определяются как

$$z_{\text{м}} = \frac{2\pi}{w}. \tag{2}$$

Количество зон обзора по углу места определяется в виде

$$z_{\text{аз}} = \frac{a_{\text{м}}}{w}. \tag{3}$$

Время обратного хода ограничивается быстродействием привода внутреннего контура и может быть оценено как

$$t_{\text{обр.ход}} = 6 \cdot t_{\text{п}}, \tag{4}$$

где t_n – электромагнитная постоянная времени привода.

С другой стороны, время обратного хода должно быть равно времени, которое внешний контур тратит на прохождение угла (1– k)w, где k – часть угла поля зрения, отрабатываемого внутренним контуром, $0 < k < 1$.

Таким образом, угловую скорость вращения внешнего контура можно определить как

$$v_{вк} = \frac{(1-k)\cdot w}{t_{обр.ход}}. \quad (5)$$

Следует также учесть время перехода внешнего контура при смене зоны обзора по углу места, которое можно оценить также по выражению (4).

Общее время формирования панорамного кадра определяется выражением

$$t = [(t_н + 2 \cdot t_н) \cdot z_м + 6 \cdot t_п \cdot (z_м - 1)] \cdot z_{аз} + 6 \cdot t_п \cdot (z_{аз} - 1). \quad (6)$$

Таким образом, с учётом начальных условий и ограничений по времени накопления и быстродействию привода можно определить параметры временной диаграммы работы внутреннего контура и угловую скорость вращения внешнего контура. Пример расчёта для различных начальных условий приведен в таблице 2.

Таблица 2. Технические параметры двухконтурной системы кругового обзора с МФП.

Начальные условия	**Значение**		
Электромагнитная постоянная времени, мс	0,5		
Время накопления, мс	10	0,1	0,1
Тип матричного приёмника излучения	Микро-болометр	CdxHg(1-x)Te, InSb	CdxHg(1-x)Te, InSb
Мгновенное поле зрения, мрад	0,5	0,5	0,25
Число элементов в МФП, пиксель	640×480		
Угол сканирования по углу места, градус	60		
Рассчитанные параметры			
Угловое поле зрения, градус	18		
Количество зон	64		
Часть угла поля зрения, отрабатываемого внутренним контуром	0,6		
Время обратного хода, мс	3		
Время формирования панорамного кадра, с	0,9	0,3	1,66

Заключение

Двухконтурное построение ИК-системы кругового обзора для обнаружения высокоскоростных малоразмерных воздушных целей обеспечивает увеличение быстродействия и сокращение времени формирования панорамного изображения, что позволяет своевременно выявлять подлёт БПЛА и других авиационных средств к охраняемой зоне.

Из таблицы 2 видно, что по сравнению с одноконтурной системой кругового обзора, применение двухконтурной системы позволяет более чем на порядок увеличить её быстродействие.

Следует также отметить, что для систем кругового обзора на микро-болометрических матрицах время формирования панорамного кадра определяется временем накопления. В случае применения охлаждаемого МФП ограничивающим фактором является быстродействие привода внутреннего контура.

Дальность действия системы кругового обзора напрямую определяется разрешающей способностью ИК-канала, которая может наращиваться за счёт уменьшения мгновенного поля зрения [3]. Однако при этом следует учитывать увеличение времени формирования панорамного изображения. Таким образом, при формировании начальных условий при построении системы кругового обзора важно из скоростных и габаритных параметров воздушных целей определить оптимальный баланс между дальностью действия и быстродействием системы кругового обзора.

Литература

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
2. John L. Miller, Scott P. Way, Bruce Ellison, Cynthia L. Archer. Design challenges regarding high-definition electro-optic/infrared stabilized imaging systems – Optical Engineering, 2013, v. 52, № 6.
3. Pieter A. Jacobs Thermal infrared characterization of ground targets and backgrounds – SPIE Press, 2006. – 190 p.

УДК 535.318:621.397

Алимов А.Е., к.т.н.
Шавкунов О.В.

ДВУХСПЕКТРАЛЬНАЯ ИНТЕГРИРОВАННАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ НАБЛЮДЕНИЯ

В работе представлены результаты габаритного и аберрационного расчётов двухспектральной телетепловизионной оптической системы для оптико-электронных средств наблюдения, обеспечивающей регистрацию объектов в видимом (0,6-1,1 мкм) и среднем инфракрасном (3-5 мкм) участках спектра электромагнитных волн.

Введение

В настоящее время в прикладном телевидении широкое применение получают многодиапазонные оптико-электронные системы (ОЭС), обеспечивающие одновременную регистрацию объектов в различных участках спектра электромагнитных волн. Интеграция таких ОЭС в комплексы военного назначения позволяет успешно решать задачи их круглосуточного функционирования в условиях плохой видимости из-за наличия дымов, туманов и других негативных факторов [1, 2]. При этом многократно повышается эффективность обнаружения, распознавания и идентификации объектов на фоне помех естественного и искусственного происхождения, за счёт возможности дифференцирования объектов не только по геометрической форме, но и по их спектральным сигнатурам. Дополнительным преимуществом является то, что оптимальным диапазоном для обнаружения того или иного объекта может быть один, а для его идентификации – другой. Это и обуславливает широкое распространение многодиапазонных ОЭС, даже несмотря на необходимость принимать и обрабатывать в реальном масштабе времени существенно большие объёмы информации, чем при использовании однодиапозонных ОЭС [3].

При проектировании таких ОЭС одной из важнейших задач, которую требуется решить разработчику, является выбор оптимального способа выделения рабочих спектральных диапазонов, в которых будет производиться регистрация исследуемых объектов. Причём такое выделение, как правило, требуется выполнять уже во входном звене ОЭС, а именно в приёмной оптической системе (ПОС), которая собирает входной поток излучения от

объектов и формирует его с требуемым масштабом, качеством изображения и спектральным составом на фотоприёмном устройстве (ФПУ).

Простейшим вариантом является механическое объединение двух или более автономных систем, каждая из которых имеет собственные ПОС и ФПУ, обеспечивающие работу в определённых спектральных каналах [3]. Такие системы широко распространены как в России, так и за рубежом благодаря высокому пространственному разрешению во всех рабочих спектральных диапазонах и простоте оперативного управления составом и шириной рабочих спектральных диапазонов. К недостаткам таких ОЭС можно отнести увеличенные массогабаритные характеристики, а также наличие эффекта параллакса из-за взаимной несоосности визирных осей ПОС каждого из спектральных каналов. Последнее приводит к ошибкам при синтезе общего разноспектрального изображения и снижению тактико-технических характеристик изделия. Заметим, что ОЭС часто включают в себя сферические обтекатели, которые устанавливаются перед ПОС и выполняют защитные функции. Децентровка визирных осей ПОС спектральных каналов относительно оси обтекателя приводит к дополнительному ухудшению качества изображения [4].

Одним из способов устранения указанных выше недостатков является частичная интеграция ПОС отдельных спектральных каналов в оптическую систему с общей визирной осью и выделение рабочих спектральных диапазонов при помощи спектроделительных оптических элементов.

В данной работе представлены результаты габаритного и аберрационного расчётов интегрированной двухдиапазонной телетепловизионной ПОС для пассивных средств наблюдения, обеспечивающей обнаружение и сопровождение объектов в видимой (0,6-1,1 мкм) и средней инфракрасной (3-5 мкм) областях спектра.

Принципиальная схема и основные характеристики ПОС

Основные оптические характеристики разработанной ПОС представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные оптические характеристики разработанной ПОС.

Характеристика	**Телевизионный канал**	**Тепловизионный канал**
Рабочий спектральный диапазон, мкм	0,6-1,1	3-5
Угловое поле в пространстве предметов, 2ω (°)	4,2	4,2
Линейное поле в пространстве изображений, 2*y*’ (мм)	6,0	12,3
Относительное отверстие, *D*/*f*’	1:2	1:4
Эффективное относительное отверстие $(D/f')_{эф}$	1:2,5	1:5,4
Габаритные размеры: Длина х Диаметр, мм	198 х 51,5	

С целью обеспечения заданных критериев обнаружения и распознавания целей угловые поля в пространстве предметов для каждого из каналов были выбраны одинаковыми и равными 4,2°. Система рассчитывалась для совместной работы со следующими ФПУ:

1) телевизионный канал – матрица типа КМОП формата 1/3” (1280х960 пикселей, размер пикселя – 3,75 мкм);

2) тепловизионный канал – охлаждаемый фотоэлектронный модуль на основе антимонида индия (InSb) ФЭМ29М производства «НПП «ОРИОН» (640х512 пикселей, размер пикселя – 15 мкм).

Относительное отверстие тепловизионного канала выбиралось исходя из размеров «холодной» диафрагмы ФЭМ29М и расстояния от неё до плоскости фоточувствительных элементов.

В качестве прототипа разработанной ПОС была выбрана схема объектива «Янус-1», созданная для телетепловизионной системы наблюдения [5]. На рисунке 1 показаны её основные элементы. ПОС представляет собой зеркально-линзовый объектив, который имеет единую визирную ось (ВО) для обоих каналов. Красным цветом обозначен ход лучей и оптические элементы, участвующие в формировании тепловизионного изображения в плоскости (ПИ1). Синим цветом, соответственно, обозначен ход лучей и оптические элементы, участвующие в формировании телевизионного изображения в плоскости (ПИ2). Система включает в свой состав один спектроделительный

элемент (СДЭ), который выполнен в виде асферической поверхности с нанесённым на неё дихроичным покрытием, которое обеспечивает отражение электромагнитного излучения в диапазоне длин волн (8-12) мкм и пропускание – (0,6-1,1) мкм. В качестве ФПУ тепловизионного канала использовался пировидикон. В телевизионном канале устанавливался матричный ПЗС-приёмник.

В разработанной ПОС, по сравнению с прототипом, было произведено изменение, связанное с габаритными размерами и конструктивными особенностями ФЭМ29М, а именно тепловизионный канал был перенесён за спектроделительный элемент, при этом телевизионный был помещён перед ним. Также в тепловизионный канал была добавлена проекционная система для сопряжения с апертурой ФПУ.

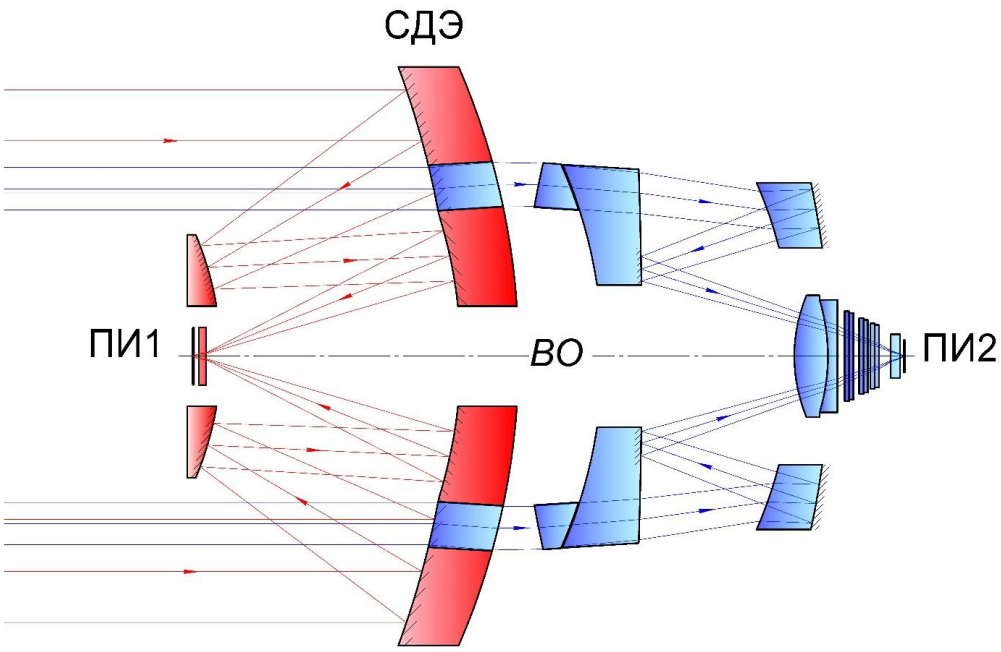


Рис. 1. Принципиальная схема прототипа ПОС телетепловизионной системы наблюдения.

Для оптимального сопряжения в тепловизионном приборе объектива с охлаждаемым ФПУ, имеющим «холодную» диафрагму, необходима такая конструкция объектива, которая сформировала бы выходной зрачок, вынесенный в пространство между последней поверхностью объектива и плоскостью изображения. Несовпадение размера и положения выходного зрачка с «холодной» диафрагмой приводит к возрастанию паразитного излучения от элементов конструкции, а также к виньетированию наклонных

пучков и снижению облучённости по краям изображения и, как следствие, – к снижению тактико-технических характеристик ОЭС. Для достижения максимальных характеристик ОЭС «холодная» диафрагма должна выполнять функцию апертурной диафрагмы и соответственно выходного зрачка в оптической системе объектива. В связи с тем, что в зеркально-линзовом объективе вынос зрачка за линзовый корректор внеосевых аберраций приводит к существенному росту световых диаметров зеркал, а также усложнению коррекции остаточных аберраций, в тепловизионном канале потребовалось применение дополнительной проекционной системы с линейным увеличением β=-2,05^x и угловым увеличением γ=-0,49^x.

Результаты расчёта ПОС

Аберрационный расчёт выполнялся в программе для автоматизированного расчёта оптических систем Zemax [6]. Принципиальная схема разработанной ПОС представлена на рисунке 2.

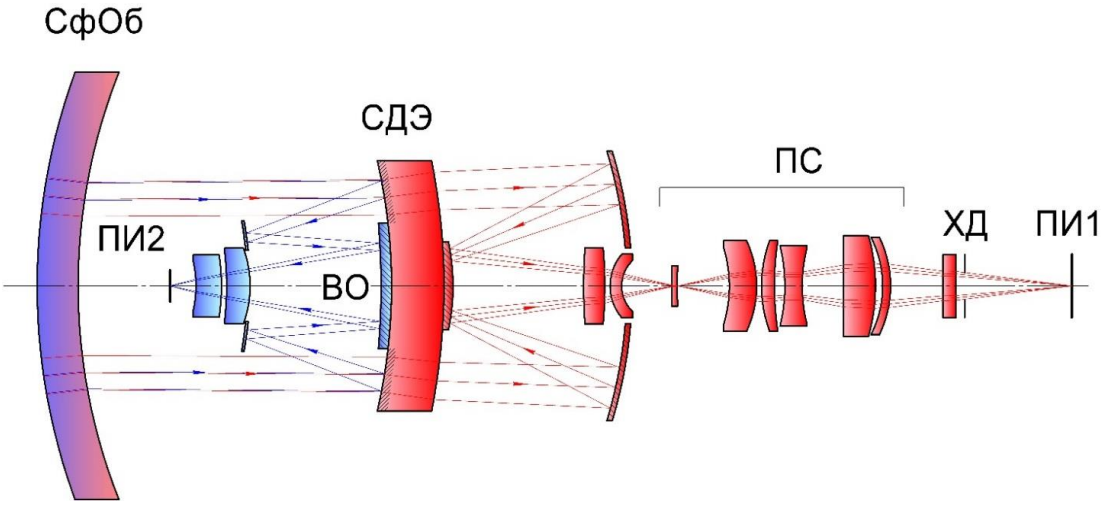


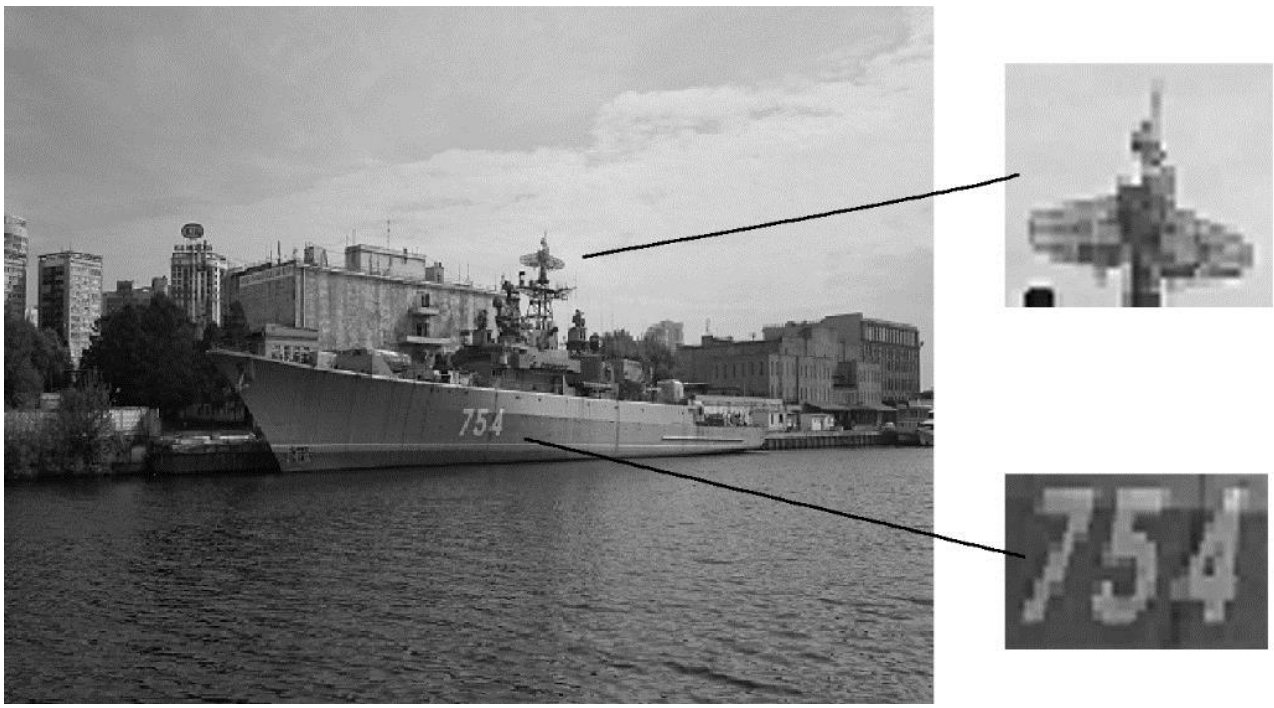
Рис. 2. Принципиальная схема разработанной ПОС.

Данная схема включает в себя сферический обтекатель (СфОб), зеркально-линзовые объективы теле- и тепловизионного каналов, имеющие единую визирную ось, и проекционную систему (ПС). Выходной зрачок объектива тепловизионного канала совпадает с «холодной» диафрагмой (ХД) ФПУ. Аналогично рисунку 1 красным цветом обозначен ход лучей и оптические элементы, участвующие в формировании тепловизионного изображения в плоскости (ПИ1); синим цветом – телевизионного изображения в плоскости (ПИ2). Выделение рабочих спектральных диапазонов обеспечивается СДЭ,

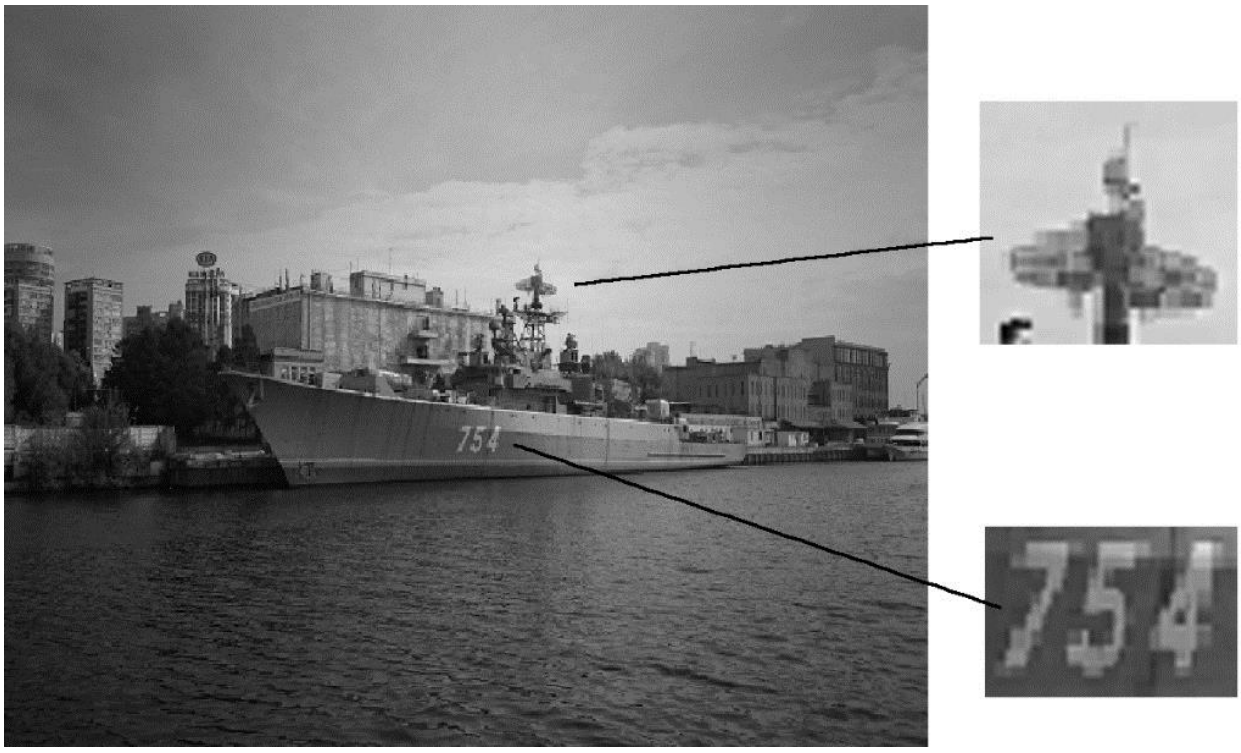
который выполнен из германия и в отличие от прототипа пропускает тепловое излучение (3-5) мкм и отражает излучение (0,6-1,1) мкм.

Интегральную оценку качества разработанной ПОС можно провести на основе анализа результатов симуляции геометрических аберраций в изображении, выполненной в программе Zemax. На рисунке 3а показано исходное изображение, на основе которого выполнялась симуляция, на рисунках 3б и 3в – её результаты для телевизионного и тепловизионного каналов соответственно. На основании сравнительного анализа рисунка 3 можно сделать вывод о высокой резкости и хорошем качестве изображения разработанной ПОС в целом. При этом в тепловизионном канале наблюдается незначительное затемнение на краях кадра. Видимая дисторсия в обоих каналах отсутствует.

а)



б)



в)

Рис. 3. Результаты симуляции качества изображения в программе Zemax.

Заключение

В статье рассмотрена двухдиапазонная ПОС для телетепловизионной системы наблюдения, которая построена на основе соосной схемы, т.е.

визирные оси двух спектральных каналов совпадают. Такая схема обеспечивает уменьшение искажений при синтезе разноспектральных изображений благодаря отсутствию эффекта параллакса, а также позволяет оптимизировать поперечные габариты системы. Результаты аберрационного расчёта показывают, что в ПОС рассматриваемого типа возможно получить изображение высокого качества в каждом из каналов. Дальнейшее развитие подобных схем должно быть связано с увеличением эффективного относительного отверстия тепловизионного канала, а также уменьшения продольных габаритов за счёт оптимизации конструктивных параметров проекционной системы.

Литература

1. Rafael Advanced Defense Systems Ltd.: URL: http://www.rafael.co.il/5630-1009-en/Marketing.aspx.
2. Raytheon Company. URL: https://web.archive.org/web/20090620062841/ http://www.raytheon.com/capabilities/products/jagm/.
3. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. – М.: Университетская книга; Логос, 2007. – 192 с.
4. Алимов А.Е., Григорьев В.А., Ситало А.А., Шахрай В.И. Особенности использования сферических обтекателей в комбинированных ТВ-системах // Электросвязь, № 11. – М., 2008. – С. 25-28.
5. Патент РФ № 2091834. Светосильный зеркально-линзовый объектив / Лебедева Г.И., Гарбуль А.А., Березанский В.М., Еськов Д.Н., Хакунов В.Х. – Приоритет от 1997.
6. ZEMAX Optical Design Program. User’s Guide. Version 10.0. Tucson (Arizona, USA): Focus Software, Incorporated, 2003. – 478 p.

УДК 62-526

Салата Д.В.
Ермошин К.Д.

РАЗРАБОТКА РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА СТАБИЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ

В статье рассмотрен разработанный робот-манипулятор с системой управления, на основе моделирования в среде Matlab Simulink с оригинальным программным обеспечением на языке C++. Создана математическая модель движения подвижной плиты с установленной на ней оптико-электронной системой (ОЭС). Робот-манипулятор позволяет осуществлять оперативный анализ качества стабилизации телевизионных и тепловизионных изображений в ОЭС по углам курса, крена и тангажа или их комбинаций. Проведены экспериментальные исследования робота-манипулятора.

Введение

При использовании оптико-электронных систем (ОЭС), находящихся на движущихся объектах (самолёте, вертолёте, танке и др.) возникает проблема стабилизации формируемых изображений. Существует множество методов и устройств решающих эту проблему. Для проверки качества работы методов стабилизации требуется имитация нахождения ОЭС на движущемся аппарате. Имитацию нахождения ОЭС на движущемся объекте можно осуществить применением параллельного робота-манипулятора.

Роботы-манипуляторы параллельной кинематики имеют ряд свойств, которые их выгодно отличают от манипуляторов с последовательной кинематикой. Достоинствами параллельных механизмов являются: высокая жёсткость, равномерное распределение полезной нагрузки, высокая точность позиционирования, низкая инерция движущихся частей и простое решение уравнений обратной кинематики, необходимых для его управления.

Параллельные роботы-манипуляторы имеют ограниченную рабочую область движения вследствие того, что кинематические цепи не могут удлиняться полностью за счёт накладывания связей других цепей. Существует несколько параллельных кинематических цепей между опорной плитой и конечной подвижной плитой. В данной статье рассматривается построение

робота-манипулятора на основе платформы Гью-Стюарта, которая имеет 6 степеней свободы движения.

Принцип построения робота-манипулятора

Обычный вариант робота-манипулятора имеет шесть линейно приводимых в действие механических «ног» (Рисунок 1). Полная сборка робота-манипулятора представляет собой параллельный механизм, состоящий из жёсткого верхнего тела (подвижная плита), соединенного с неподвижной опорной плитой. Робот-манипулятор состоит из: опорной плиты – 1, подвижной плиты – 2, механических «ног» – 3 и штоков – 4. «Ноги» соединены с опорной плитой в шести точках универсальными шарнирами, как показано ниже. Шток каждой «ноги» соединен с подвижной плитой универсальным шарниром.

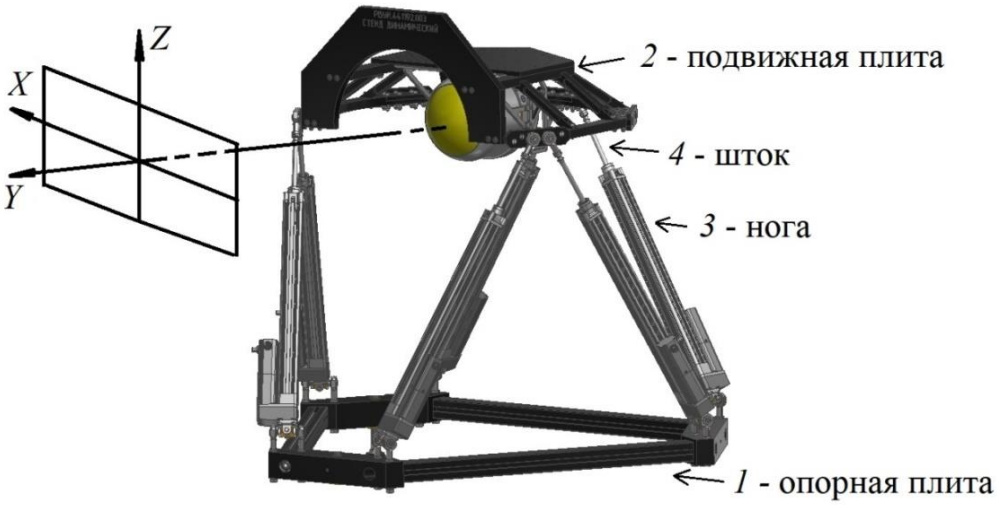


Рис. 1**.** Робот-манипулятор (модель).

На рисунке 2 представлены фотографии разработанного робота-манипулятора с установленной гиростабилизированной телевизионной системой в разных положениях.

В качестве привода для каждой «ноги» применяется мотор фирмы *Dunkermotoren*. Его характеристики: максимальная линейная скорость $V = 0{,}5$ м/с, максимальное ускорение $a = 6$ м/с^2, номинальная мощность $P = 90{,}5$ Вт. Привода соединены со штоками фирмы *SKF*, которые имеют максимальную длину хода $l = 0{,}4$ м.

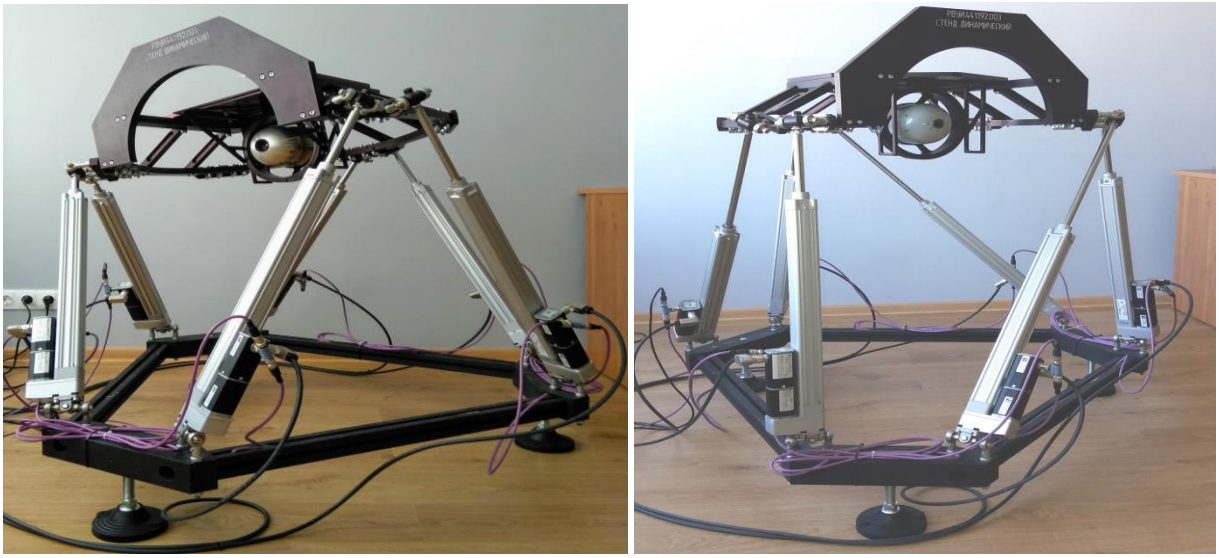


Рис. 2**.** Робот-манипулятор с установленной телевизионной системой в разных положениях.

Выдвижение штоков можно осуществлять в двух режимах: по положению и по скорости. Режим по положению не используется по причине более длительного времени срабатывания, по сравнению с режимом по скорости. Поскольку у каждой «ноги» своя скорость выдвижения, режим по скорости более практичен.

Частота установки очередной скорости привода выбрана $\nu = 20$ Гц. Частота выбрана исходя из динамических характеристик привода.

Прямая кинематика параллельного робота является очень сложной задачей, поскольку требует решения многих нелинейных уравнений. Для управления роботом-манипулятором решается обратная кинематическая задача, то есть по заданному положению и ориентации подвижной плиты требуется найти длину выдвижения штоков. Эта задача имеет единственное решение. На рисунке 3 показана схема расчёта длины штока для заданного положения подвижной плиты.

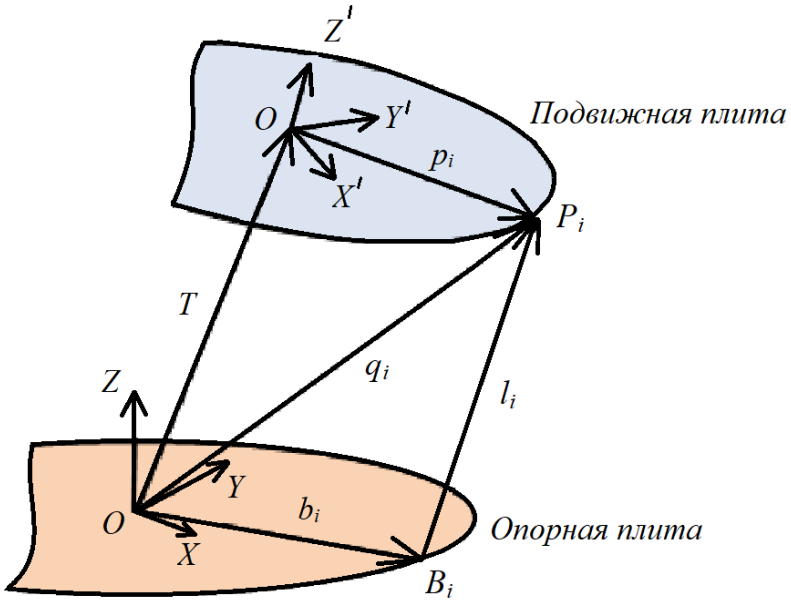


Рис. 3. Расчёт координат штока для заданного положения подвижной плиты.

Координаты шарниров подвижной плиты относительно системы координат основания определяются по формуле:

$$q_i = T + R \times p_i \tag{1}$$

где q_i – координата шарнирного крепления i-ноги к подвижной плите относительно неподвижной системы координат основания, T – вектор линейного перемещения подвижной плиты относительно неподвижной опорной плиты, R – матрица поворота, p_i – координата шарнирного крепления i-ноги к подвижной плите относительно её системы координат. Матрица поворота R имеет вид:

$$R = \begin{pmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\varphi + \sin\varphi\sin\theta\cos\psi & \sin\varphi\sin\psi + \cos\varphi\cos\psi\sin\theta \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\varphi\cos\psi + \sin\varphi\sin\psi\sin\theta & -\sin\varphi\cos\psi + \cos\varphi\sin\psi\sin\theta \\ -\sin\theta & \sin\varphi\cos\theta & \cos\varphi\cos\theta \end{pmatrix} \tag{2}$$

где ψ, θ, φ – углы курса, тангажа и крена соответственно.

Из рисунка 5 видно, что искомая длина i-ой ноги l_i равна:

$$l_i = q_i - b_i \tag{3}$$

$$q_i = T + R \times p_i - b_i \tag{4}$$

где b_i – вектор, определяющий координаты крепления ног к опорной плите. Уравнение (4) определяет длину выдвижения штоков для достижения желаемого положения подвижной плиты.

На рисунке 4 указаны размеры и угловые величины, необходимые для расчёта координат крепления шарниров к опорной и подвижной плитам: R, r – радиусы опорной и подвижной плиты соответственно, H – высота робота-манипулятора в начальном положении, α, β – углы смещения для опорной и подвижной плиты соответственно.

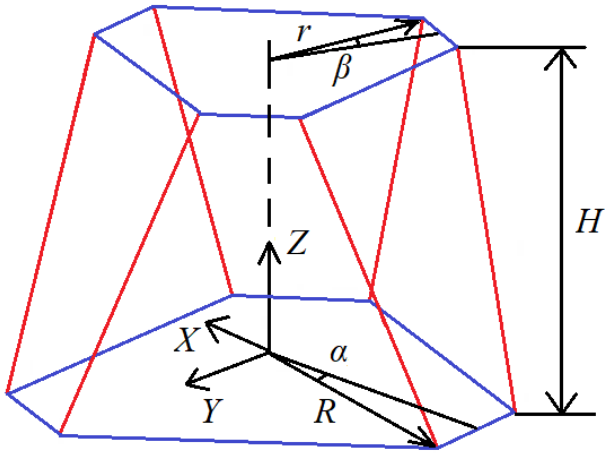


Рис. 4. Математическая схема робота-манипулятора.

На рисунке 5 показана *Simulink*-модель расчёта длин выдвижения штоков. Она состоит из следующих блоков: желаемая траектория (ЖТ) движения подвижной плиты, матрица поворота (МП), координаты подвижной плиты (КП) в начальном положении, желаемое смещение (ЖС) по осям X, Y, Z координаты точек (КТ) основания, первоначальная длина (ПД) штоков, вычисление длины (ВД) штоков.

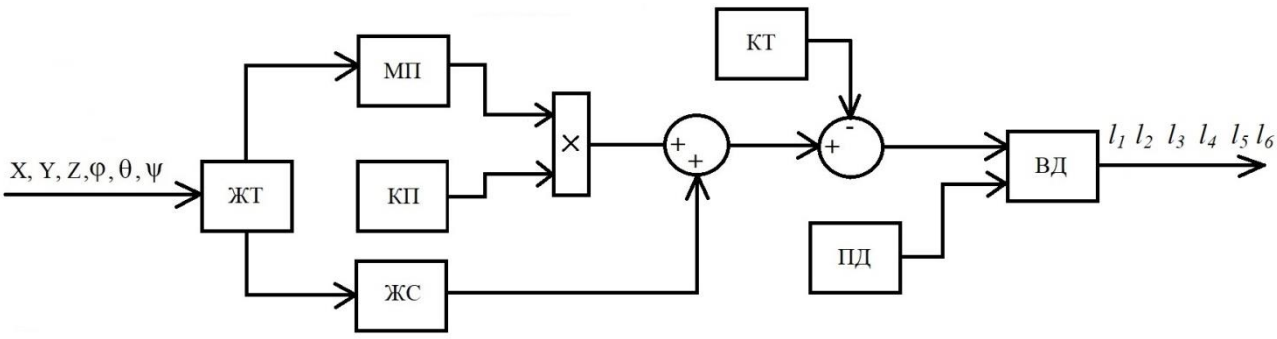


Рис. 5. Модель решения обратной кинематической задачи в среде *Matlab Simulink.*

Описание программного обеспечения для управления роботом-манипулятором

В среде *Matlab Simulink* проводился расчёт скоростей выдвижения штока для каждой из «ног» робота-манипулятора в соответствии с желаемой траекторией движения центра подвижной плиты. Для управления приводами и передачи на них требуемых скоростей, используется интерфейс *CAN*. Он устойчив к помехам и может работать в режиме реального времени. Последнее требование существенно, так как все привода соединены последовательно, и временные задержки могут привести к некорректной работе робота-манипулятора.

Для работы с интерфейсом *CAN* и для управления движением робота-манипулятора было разработано программное обеспечение на языке C^{++}. Оператор может выбрать один из трёх режимов работы: исполнение скрипта, созданного в *Matlab*, презентацию или синусоидальное движение по курсу или по тангажу. На рисунке 6 представлен алгоритм программы для управления роботом-манипулятором.

При исполнении скрипта, оператор выбирает заранее созданный файл.

При выборе режима синусоидального движения оператору необходимо задать четыре параметра: частоту, скорость и позицию, с которой начинается колебание, а также режим колебания (курс или тангаж). Для первоначальной настройки позиции, с которой начинается колебание, предусмотрена возможность перемещения робота-манипулятора на позицию, выбранную оператором.

В режиме презентации робот-манипулятор совершает базовые перемещения по осям *X, Y, Z* и по углам курса, крена и тангажа.

Во всех режимах (скрипт, презентация или синусоидальное движение), после установки необходимых параметров и запуска, программа в автоматическом режиме меняет скорость выдвижения штоков в зависимости от заданной траектории движения подвижной плиты, но у оператора есть возможность остановить робот-манипулятор при необходимости в любой момент времени.

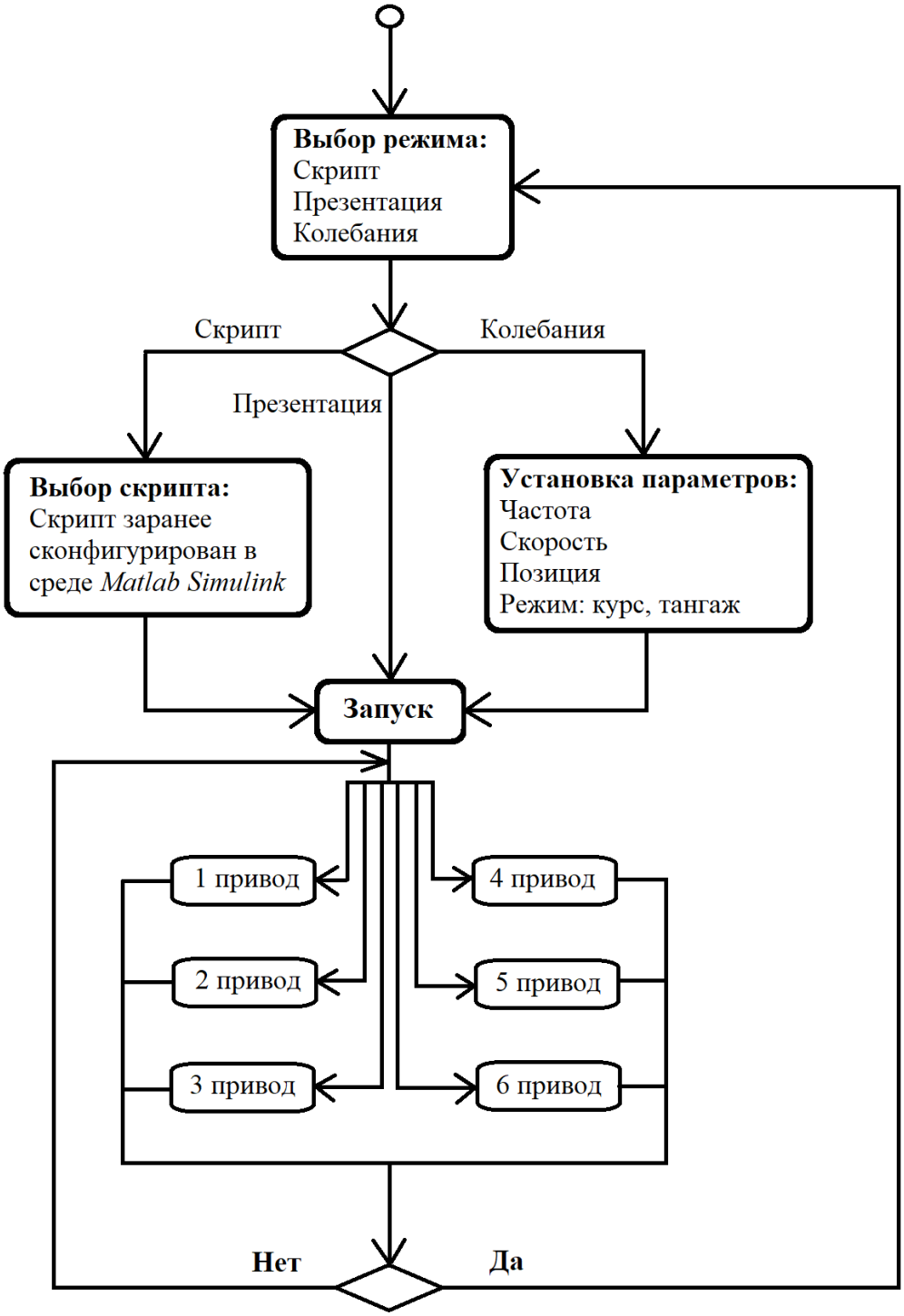


Рис. 6. Алгоритм работы программы.

Экспериментальные исследования

Для оценки точности созданной математической модели движения объекта был проведен ряд экспериментов, заключающихся в сравнении углов, получаемых из модели и с гироскопа, установленного на подвижной плите робота-манипулятора.

На рисунке 5 показаны углы поворота центра подвижной плиты по курсу по синусоидальному закону с амплитудой A = 5 градусов и частотой ν = 2 Гц, полученные с гироскопа и полученные по модели. Несоответствие траектории движения робота-манипулятора и его модели объясняется тем, что приводу, толкающему шток необходимо некоторое время для установления заданного значения скорости.

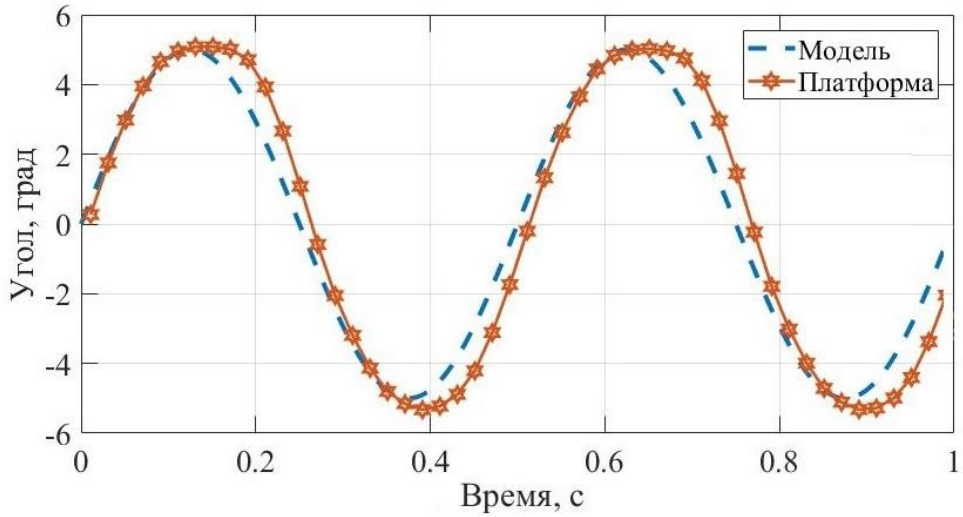


Рис. 7**.** Смещение подвижной плиты по курсу.

В таблице 1 приведены основные характеристики робота-манипулятора.

Таблица 1. Основные характеристики робота-манипулятора.

Характеристика	**Значение**
Максимальная высота подъема	0,45 *м*
Максимальное смещение:	
по оси X	± 0.3*м*
по оси Y	± 0.3*м*
Диапазон прокачки на половине высоты по:	
- тангажу	$\pm 30°$
- курсу	$\pm 45°$
- крену	$\pm 30°$

На рисунке 8 показана кинематика выдвижения штоков при которой подвижная плита поворачивается одновременно вокруг трёх осей по синусоидальному закону с амплитудой A=10 градусов и частотой ν = 0,1 Гц для каждого из углов. Изначально подвижная плита поднимается на половину высоты, что соответствует половине длины выдвинутых штоков Δl~0,2 м. При

задании траектории движения подвижной плиты важно, чтобы длина выдвижения штоков была в диапазоне допустимых значений. Из рисунка 8 видно, что длины штоков находятся в пределах 0…0,4 м, следовательно, такую траекторию можно воспроизвести на роботе-манипуляторе.

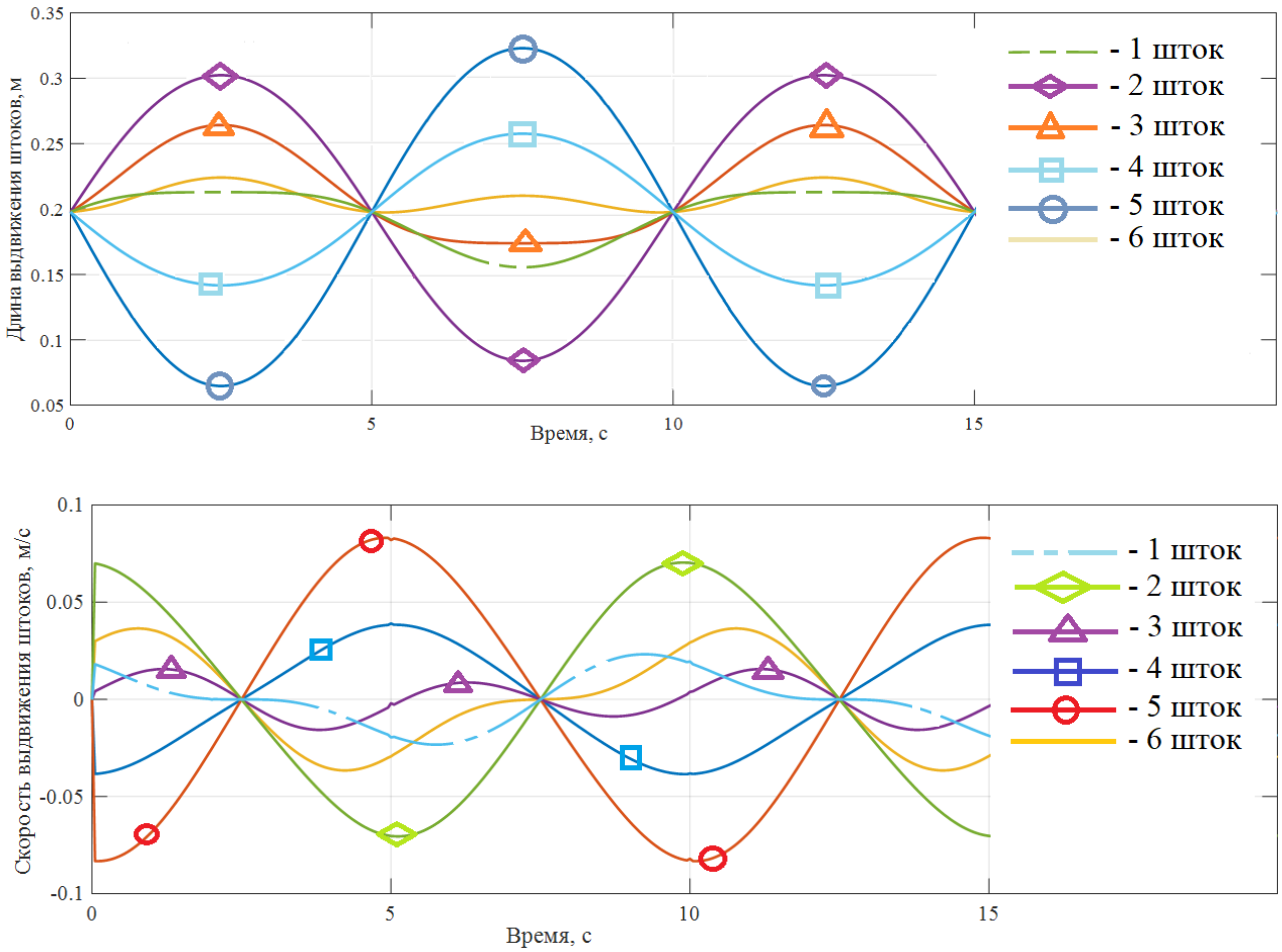


Рис. 8. Кинематика выдвижения штоков.

Заключение

Создан действующий робот-манипулятор с системой управления на основе моделирования в среде *Matlab Simulink* с оригинальным программным обеспечением на языке C^{++}. Данный робот-манипулятор позволяет осуществлять оперативный анализ качества стабилизации телевизионных и тепловизионных изображений в оптико-электронных системах по углам курса, крена и тангажа или их комбинаций. Проведенные экспериментальные исследования показали, что разработанная математическая модель движения подвижной плиты с установленной на ней ОЭС, точно воспроизводится движением робота-манипулятора с задаваемой погрешностью.

Применение такого способа оценки качества стабилизации телевизионных и тепловизионных изображений позволит на ранних этапах разработки проверять их работоспособность и выявлять недостатки для различных типов аппаратуры, имеющих разные габаритно-весовые показатели и обеспечивающие решение различных обзорно-поисковых и других задач.

Литература

1. D. Stewart, A Platform with Six Degrees of Freedom, UK Institution of Mechanical Engineers Proceedings 1965-66, Vol.180, Pt 1, No 15.
2. Rui Chen. Applied robotics and parallel kinematics – Modeling and development of a Stewart-Gough platform. Master of Science Thesis, Stockholm, Sweden, 2010.
3. Салата Д.В. Применение платформы Гью-Стюарта в задачах стабилизации изображения // Материалы научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, филиал ФГУП «ГНП РКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС» – «НПП «ОПТЭКС», 2018.

УДК 623.746-5

Сухачев А.Б., д.т.н.

ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В СОВРЕМЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСАХ МОНИТОРИНГА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

В работе рассмотрены вопросы организации обмена видеоинформацией в современных авиационных комплексах мониторинга подстилающей поверхности, включая вопросы её формирования и сжатия для передачи по цифровым каналам связи с ограниченной пропускной способностью.

Введение

Большое значение для выполнения целевой функции авиационных комплексов мониторинга подстилающей поверхности имеет качество получения информации о целевом объекте, а также возможность передачи информации от летательного аппарата, осуществляющего мониторинг (источника информации), до пункта контроля и управления.

Одним из основных источников информации в современных бортовых системах мониторинга подстилающей поверхности являются оптико-электронные системы (ОЭС) различных спектральных диапазонов. Фотоприёмник, входящий в состав ОЭС, осуществляет преобразование потока излучения, поступающего от исследуемой зоны подстилающей поверхности, в электрический сигнал. Одной из основных характеристик ОЭС, определяющей возможность обнаружения и идентификации объектов, является её разрешающая способность, которая во многом определяется разрешающей способностью фотоприёмника и полем зрения объектива ОЭС.

В настоящее время в качестве источника видеоинформации получили широкое распространение матричные фотоприёмники (МФП) видимой и инфракрасной (ИК) областей спектра.

Современные матричные фотоприёмники имеют ячеистую (пиксельную) структуру, в которой каждая ячейка (пиксель) представляет собой точечный преобразователь потока излучения в электрический сигнал. Размер пикселя определяется технологическими возможностями производителя фото-приёмника.

Для обмена информацией в современных комплексах авиационных систем мониторинга подстилающей поверхности широко применяются цифровые радиолинии.

Оценка информационных потоков, формируемых бортовыми оптико-электронными системами

Величина информационного потока, формируемого на выходе бортовой оптико-электронной системы, может быть оценена по выражению [1-3].

$$Q = W / T_{\text{ВИ}} = W \cdot C_{\text{ВИ}}, \text{ Мбит/с},$$

где W – объём информации в одном кадре, формируемом ОЭС, Мбит; $T_{\text{ВИ}}$ – период обновления информации, с; $C_{\text{ВИ}}$ – скорость обновления информации, кадр/с.

Объём информации в одном кадре, формируемом ОЭС, при условии квадратного сечения пикселя, составляет

$$W = A \cdot B \cdot n, \text{ Мбит},$$

где $A \cdot B$ – количество элементов изображения в одном кадре, пикселей; n – количество информации в одном пикселе, бит.

Количество информации в одном пикселе соответствует количеству уровней градаций яркости N $n = \log_2 N$. В соответствии с ГОСТ 7845-92 n=8.

Для оценки информационных потоков, формируемых бортовыми ОЭС, можно рассмотреть телевизионные МФП на основе ПЗС (*прибор с зарядовой связью*) формата 720х576 пикселей (стандартной чёткости) и 1920х1080 пикселей (высокой чёткости), а также тепловизионные фотоприёмники на основе неохлаждаемого микроболо-метрического МФП формата 384х288 и 640х480 пикселей. Характеристики информационных потоков от этих фотоприёмников при скорости обновления информации на их выходе 50 кадров/с и 25 кадров/с приведены в таблице 1.

Наличие цифровой обработки информации в тракте информационного обмена обеспечивает возможность адаптации (сжатия) потока передаваемой информации к возможностям применяемого канала информационного обмена и обеспечение высокой достоверности передаваемых данных за счёт применения

устройств кодирования информации с её восстановлением с заданным уровнем потерь на приёмном конце за счёт процедуры декодирования.

Таблица 1. Характеристики информационных потоков.

Вид фотоприёмника	**Формат МФП, пикселей**	**Информационный объём кадра, Мбит**	**Необходимая скорость передачи информации (не менее), Мбит/с (50/25 кадр/с)**	**Степень сжатия для обеспечения передачи по каналу с пропускной способностью 10 Мбит/с (не менее), раз (50/25 кадр/с)**
ПЗС (КМОП) МФП стандарной чёткости	720x576	3,3	166/83	17/8,5
ПЗС (КМОП) МФП высокой чёткости	1920x1080	16,6	830/415	84/42
Микроболометрический МФП	384x288	0,9	44,2/22,1	4,5/2,2
Микроболометрический МФП	640x480	2,5	123/61,5	12,3/6,2

Скорость выполнения цифровой обработки сигнала определяется объёмом обрабатываемой информации, вычислительными возможностями аппаратуры и видом алгоритмов обработки информации. При этом время задержки информации при использовании современных стандартов сжатия, может составлять от 0,1 до нескольких секунд в зависимости от производительности процессора.

При передаче текущего потока видеоинформации такая задержка незаметна для оператора. В то же время, при необходимости использовать поступающую информацию в процессе наведении на объект, такая задержка может отрицательно повлиять на конечную точность наведения.

Обобщенная функциональная схема цифровой передачи видеоинформации представлена на рисунке 1. Здесь источник видеоинформации формирует изображение зоны мониторинга (исходное изображение). Для передачи видеоинформации по каналу связи с ограниченной пропускной способностью

требуется её сжатие на передающей стороне с последующим восстановлением на приёмной стороне при минимизации потерь информации [1-3].

В последнее время наиболее распространённой является структура сжатия цифровых изображений, основанная на преобразовании исходных данных по следующему алгоритму: перевод изображения из пространственной области в пространственно-частотную область (пространственная декорреляция); квантование; кодирование.

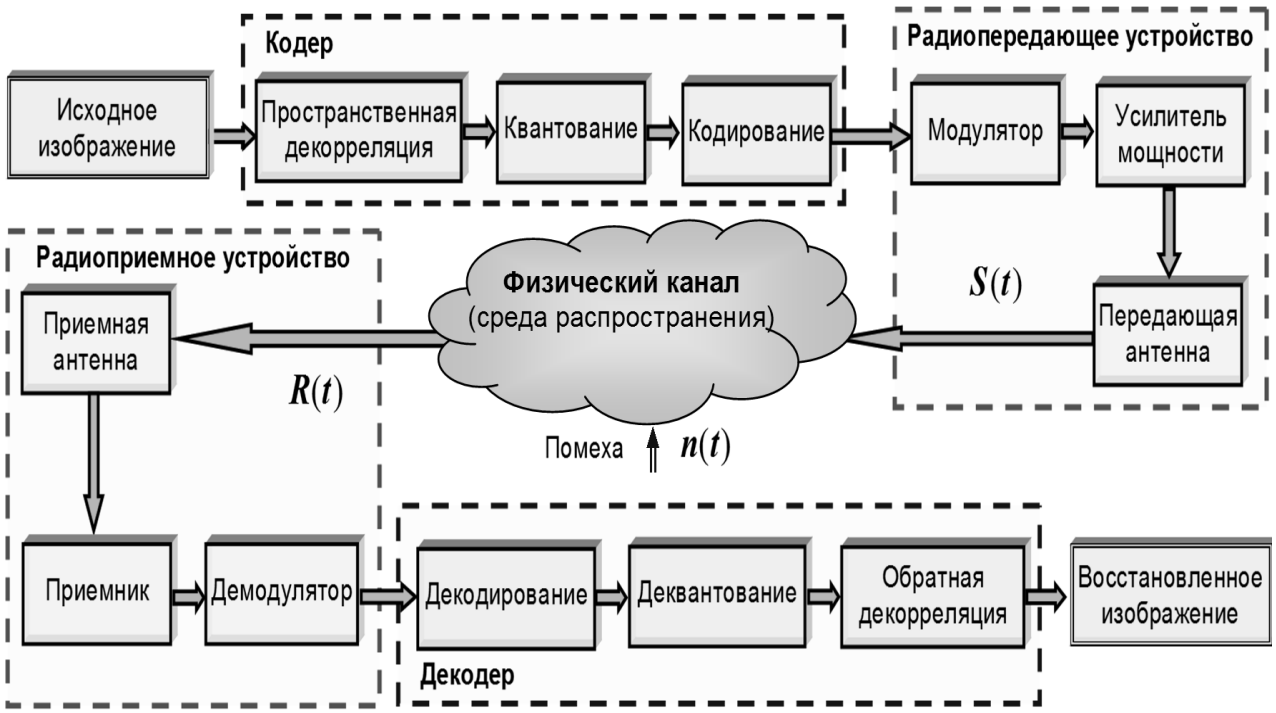


Рис. 1. Функциональная схема системы цифровой передачи видеоинформации.

Канальное кодирование применяется для исправления возникающих при передаче по каналу связи ошибок. При этом в полученную информационную последовательность вносится некоторая избыточность.

К основным характеристикам кодов (Рисунок 2) относятся: k – длина кодового блока на входе кодера; n – длина преобразованного кодового блока на выходе кодера; $R = k/n$ – кодовая скорость.

Закодированные данные с выхода кодера поступают на модулятор, который с помощью какого-либо метода модуляции преобразует их в сигнал $S(t)$, поступающий затем в физический канал (среду распространения). В физическом канале сигнал $S(t)$ подвергается воздействию помех $n(t)$.

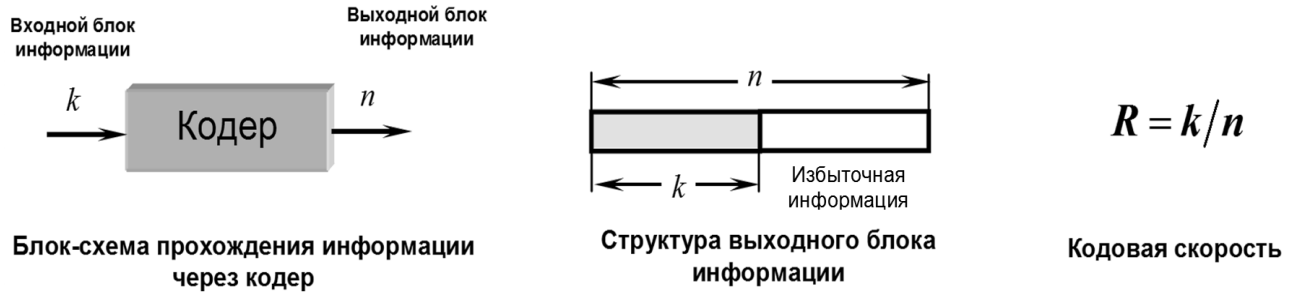


Рис. 2. Преобразование информационных блоков при прохождении через кодер.

Для количественной оценки степени влияния помех $n(t)$ на сигнал $S(t)$ обычно используют отношение сигнал-шум (С/Ш), определяемое как отношение мощности сигнала $P_{\text{С}}$ к мощности шума $P_{\text{Ш}}$.

Сигнал $R(t)$, принятый из физического канала, через приёмную антенну и приёмник попадает в демодулятор, который преобразует его в цифровую последовательность переданных данных. С выхода демодулятора сигнал поступает на вход декодера, в котором с помощью внесенной кодером избыточности осуществляется определение переданного сообщения, и далее восстановление исходного изображения путём осуществления соответствующих процедур деквантования и обратной декорреляции.

Оценка требований по скорости передачи данных от бортовых оптико-электронных систем по современным цифровым каналам связи

Основные требования по скорости передачи данных от бортовых сенсоров по цифровым каналам связи сформулированы в стандарте Северо-атлантического альянса НАТО (англ.: North Atlantic Treaty Organization) STANAG 4609 Edition 2 и во второй редакции «Руководства по реализации» этого стандарта AEDP-8 [4, 5]. Цель стандарта – повышение способности к взаимодействию между системами контроля и управления НАТО в вопросах обмена цифровыми мультимедийными изображениями (телевизионными, радиолокационными и т.д.), в том числе формируемыми на борту беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). При этом подразумевается, что прекращено развитие аналоговых средств передачи данных.

STANAG 4609 базируется на коммерческих цифровых стандартах, что позволяет использовать для записи и передачи цифровых образов коммерческое

оборудование. Кроме того, в нём учтены также специфичные военные требования для метаданных, сопровождающих видеоинформацию. Стандарт STANAG 4609 предоставляет разработчикам систем максимальную гибкость, поэтому он не определяет ни физических интерфейсов для возможности соединения (стыка) различных систем, ни их конфигурации. Название стандарта STANAG 4609 – Digital Motion Imagery – можно интерпретировать как «цифровые подвижные изображения, образы». Motion Imagery (MI) трактуется в тексте как «внешний вид или представление любой естественной либо искусственной сцены, расположенных на ней связанных объектов или протекающих на её фоне процессов деятельности». Это более общее понятие, чем просто «видеоданные».

Стандарт STANAG 4609 классифицирует всю совокупность MI по уровням сложности. Для этого в «Руководство по реализации» AEDP-8 введена матрица системы подвижных пространственно-временных образов (MISM), позволяющая отнести ту или иную систему MI к определённому уровню сложности (MISM-Level). Матрица MISM (EG 0220) имеет шесть общих категорий, охватывающих 15 уровней MI (MISM-L0 – MISM-L14).

Основа требований к каналам передачи данных – качество мультимедийной информации. Оно характеризуется разрядностью и формой пикселей, их цветностью, а также количеством пикселей в кадре изображения, частотой кадров, форматом кадра (соотношением сторон), степенью сжатия изображения, вероятностью появления ошибочных пикселей в кадре, типом изображений и их содержимым [4, 5].

При разработке радиолиний передачи видеоинформации в системах мониторинга подстилающей поверхности следует учитывать возможность появления в составе перспективных бортовых ОЭС телевизионных камер с разрешением 1920×1080×50p или 1920×1080×25p и тепловизионных камер с разрешением не менее 640x480x50p.

В таблице 2 приводится классификация систем, использующих видеоданные по уровню сложности в соответствии со стандартом STANAG 4609 (Edition 2).

Таблица 2. Классификация систем по уровню сложности.

Разрешение видеоданных	**Уровень сложности (по STANAG 4609)**	**Разрешение по горизонтали, пикселей**	**Разрешение по вертикали пикселей**	**Разрядность пикселя, бит**	**Частота кадров, Гц**	**Коэффициент сжатия изображения**	**Номинальная скорость передачи Мбит/с**
Высокое	MISM-L11	1280-1920	720p-1080p	8 или 10	24-60	–	1485
	MISM-L10M			8		10	80
	MISM-L10H			8 или 10		20	40
	MISM-L9M			8		45	19,4
	MISM-L9H			8		80	10
Улучшенное	MISM-L8	640-960	480p-576p	8 или 10	24-60	–	360
	MISM-L7M			8		10	25
	MISM-L7H			8		20	12
	MISM-L6M			8		45	5,5
	MISM-L6H			8		80	3
Стандартное	MISM-L5	720	480i-576i	8-10	24-60	до 2,5	270
	MISM-L4M			8	24-30	5,5-10	15
	MISM-L4H			8		5,5-20	10
	MISM-L3M			8		28	6
	MISM-L3H			8		56	3

Стандарт НАТО STANAG 4609 Edition 2 [4, 5] рекомендует для оценки искажений данных при передаче по каналу связи для изображений формата до 1920×1080 включительно принять уровень искажений не более одного пиксельного артефакта на кадр. Это соответствует вероятности ошибки в канале связи на уровне $10^{-9}…10^{-7}$, что, с учётом размножения ошибок при декомпрессии, пропорционального коэффициенту сжатия изображения, соответствует вероятности ошибки на выходе декодера на уровне $10^{-7}…10^{-5}$.

Оценка минимальной пропускной способности цифрового канала передачи видеоинформации и необходимых коэффициентов сжатия изображения приведена в таблице 3.

Таблица 3. Оценка минимальной пропускной способности канала передачи видеоинформации и коэффициентов сжатия изображения.

Характеристика видеосенсора		**Минимальная пропускная способность цифрового канала связи, Мбит/с**	**Коэффициент сжатия изображения**
Формат МФП, пикселей	Скорость обновления информации, кадр/с		
1920×1080	50	40,0	21
1920×1080	25	20, 0	21
1280×720	50	18,0/5,0	21/74
1280×720	25	9,0/5,0	21/37
640x480	50	7,5/5,0	16/24
640x480	25	7,5/5,0	8/12

Форматы сжатия видеоинформации

Передача и хранение телевизионных изображений сопряжена с существенными затратами пропускной способности каналов передачи и ёмкости памяти. Поэтому в настоящее время, в большинстве случаев, передача и хранение видеоинформации производятся с применением методов сжатия. Для статических изображений (в частности, фотографий) и для динамических изображений (телевизионных) используются разные классы методов сжатия, учитывающие их статистические и психовизуальные особенности.

В результате многолетних исследований в этой области разработан целый ряд форматов (систем) сжатия, которые стандартизованы на международном уровне [6, 7].

В настоящее время разработаны форматы сжатия для передачи неподвижного изображения и потокового видео (подвижного изображения). Последние анализируют межкадровую избыточность изображений и используют метод пролонгации неподвижных элементов изображения на выбранный блок кадров. За счёт этого достигается высокая степень сжатия изображения без ощутимых зрителем потерь в качестве. Эти методы широко применяются в вещательных стандартах телевидения MPEG-2, MPEG-4, H.264 и прочих.

В задачах, решаемых комплексами авиационных систем оптико-электронного мониторинга, применение методов сжатия форматов MPEG может привести к недопустимой потере информации. В подобных системах видеопоток представляет собой последовательность независимых кадров. Поэтому для таких систем применимы только методы сжатия статических или неподвижных полутоновых изображений.

При сжатии статических или неподвижных полутоновых изображений может использоваться только пространственная (внутрикадровая) избыточность, учитывающая как статистическую связь между элементами изображения (пикселями), так и ограниченность зрительных характеристик наблюдателя.

При этом сжатие может осуществляться как без потерь качества изображения (обратимое сжатие, архивирование), так и с потерями (необратимое сжатие с незаметными или допустимыми потерями качества). Практически все современные способы внутрикадрового сжатия, включая JPEG, JPEG-2000, WebP, относятся к сжатию с потерями, хотя в некоторых из них предусмотрены режимы выполнения сжатия без потерь – соответственно, с небольшими коэффициентами сжатия.

При выборе способа сжатия следует учитывать:

– характер и формат изображения;
– допускаемое снижение качества изображения;
– возможную полосу частот канала передачи;
– требуемую помехозащищенность передаваемой информации;
– возможность реализации скрытной передачи информации;
– сложность реализации аппаратуры на передающей и приёмной сторонах.

Для бортовых систем в настоящее время по возможности реализации наиболее подходит формат JPEG.

Формат сжатия JPEG является широко используемым форматом сжатия изображений для хранения и передачи полутоновых изображений. Как правило, этот формат реализует сжатие с потерями, хотя предусмотрен вариант реализации без потерь JPEG-LS, который обеспечивает небольшое, но полностью обратимое сжатие.

В целом, алгоритм основан на дискретном косинусном преобразовании Фурье (в дальнейшем – ДКП), применяемом к матрице изображения для

получения некоторой новой матрицы коэффициентов ДКП (процесс пространственной декорреляции). Для восстановления исходного изображения применяется обратное преобразование (процесс обратной пространственной декорреляции).

ДКП разлагает изображение по составляющим его частотам. Собственно сжатие обеспечивается благодаря тому, что при преобразовании образуются матрицы, в которых многие коэффициенты имеют равные или близкие к нулю значения.

Кроме того, при сжатии без заметной потери качества изображения используется относительно грубая аппроксимация коэффициентов, при которой учитываются особенности человеческого зрения, которая осуществляется путём квантования коэффициентов ДКП. При этом преобразовании теряется часть информации, но может достигаться большая степень сжатия.

Рассмотрим этот алгоритм сжатия подробнее.

Шаг 1. Перевод изображения из цветового пространства RGB, с компонентами, отвечающими за красную (Red), зеленую (Green) и синюю (Blue) составляющие цвета пикселей, в цветовое пространство YCrCb (иногда называемое YUV). В нем Y – яркостная составляющая, а Cr, Cb – компоненты, отвечающие за цвет (красный и синий цветоразностные сигналы). Следует заметить, что в случае сжатия монохромного изображения требуется использоваться только яркостную составляющую Y.

Шаг 2. Разбиение исходного изображения на матрицы 8x8 пикселов (блоки).

Шаг 3. Применение ДКП для каждого блока. При этом получаются матрицы, в которых коэффициенты в левом верхнем углу соответствуют низкочастотным составляющим изображения, а в правом нижнем – высокочастотным. Плавные изменения изображения отображаются низко-частотными составляющими, а резкие – высокочастотными.

Шаг 4. Квантование коэффициентов ДКП. Состоит в делении каждого коэффициента блока на соответствующий коэффициент матрицы квантования (далее – МК).

На этом шаге осуществляется управление степенью сжатия, которое определяет величину вносимых при сжатии потерь качества изображения. Следовательно, при использовании МК с большими коэффициентами

достигается более высокая степень сжатия, причём в квантованном блоке образуется большее количество нулей (Рисунок 3).

−26	−3	−6	2	2	−1	0	0
0	−2	−4	1	1	0	0	0
−3	1	5	−1	−1	0	0	0
−4	1	2	−1	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 3. Типовой блок квантованных коэффициентов ДКП
для блока элементов изображения размером 8×8.

В стандарт JPEG включены рекомендованные варианты МК, построенные опытным путём. Матрицы для большей или меньшей степени сжатия получают путём умножения исходной матрицы на некоторое число. При больших значениях этого числа потери для низкочастотных составляющих могут оказаться недопустимо большими и в изображении станет заметной структура блоков – квадраты 8×8 («блочность»).

Шаг 5. Перевод матрицы 8×8 в 64-элементный вектор при помощи зигзаг-сканирования. В результате в начале вектора располагаются коэффициенты матрицы, соответствующие низким частотам, а в конце – высоким.

Шаг 6. Свёртка полученных векторов при помощи кодирования длин серий с последующим энтропийным кодированием (в частности, с кодированием Хаффмана) [6, 7].

Формат JPEG обладает следующими достоинствами: распространенность; относительно простая реализация; возможность задания степени сжатия; сжатие изображения в 10-15 раз при небольшом снижении качества [6, 7].

Недостаток формата JPEG заключается в усилении эффекта блочности – изображение приобретает заметную блочную структуру (8×8) при повышении степени сжатия.

Как показано в [7] формат сжатия JPEG позволяет получить следующие отношения сигнал/шум при разных степенях сжатия изображения (Рисунок 4).

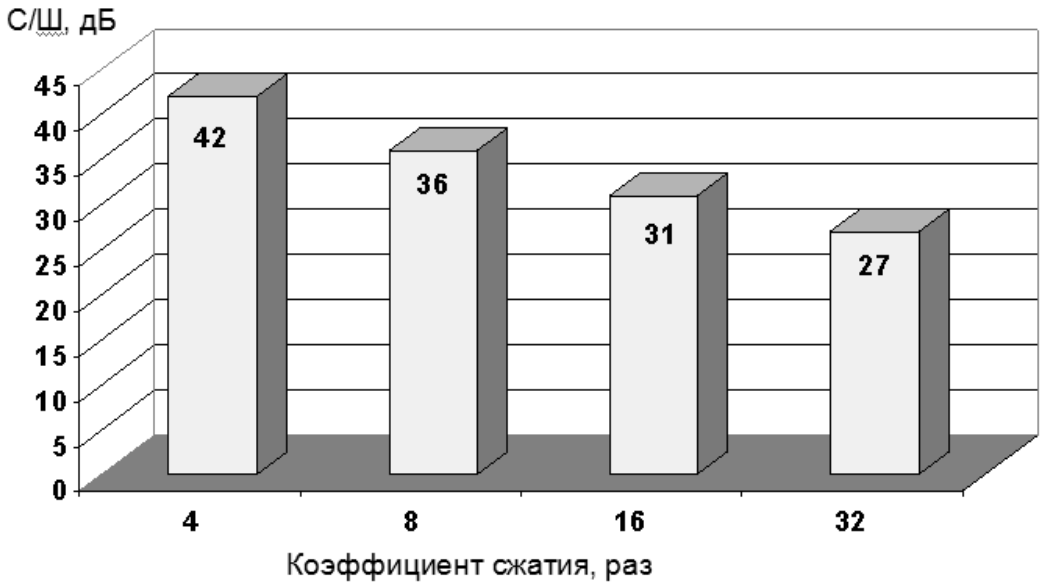


Рис. 4. Зависимость изменения С/Ш в сигнале после кодека JPEG
от степени сжатия изображения.

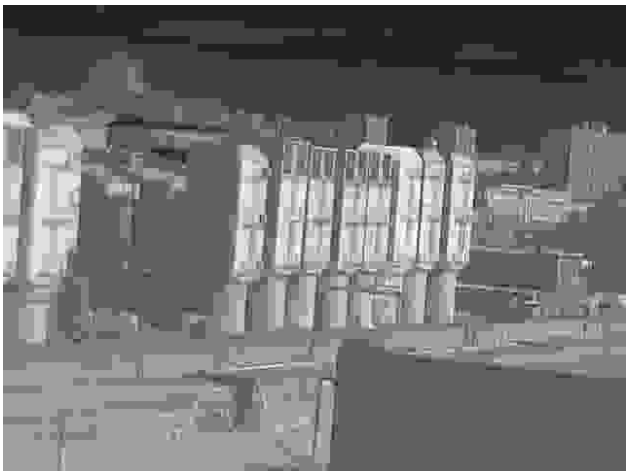
На рисунках 5, 6 приведены примеры обработки (сжатия-восстановления) видеоизображения формируемого тепловизором с микроболометричеким МФП (8…14 мкм) формата 640х480 пикселей с кадровой частотой 50 Гц, полученные при испытаниях макетов кодека JPEG.

Рис. 5. Исходное изображение К=1 *Q*=120 Мбит/с.

Коэффициент сжатия К=8 Q =15 Мбит/с

Коэффициент сжатия К=16 Q =7,5 Мбит/с

Коэффициент сжатия К=24 Q =5 Мбит/с



Коэффициент сжатия К=32 Q=3,75 Мбит/с

Рис. 6. Восстановленные изображения при использовании различных коэффициентов сжатия.

Из рисунка 6 видно, что на изображениях, обработанных с коэффициентом сжатия более 16 раз (С/Ш ≤ 30 дБ) начинают наблюдаться артефакты. При этом даже при коэффициенте сжатия 32 раз (С/Ш ≤ 27 дБ), изображение пригодно к дешифрированию.

При выборе способа сжатия в системе передачи видеоданных для авиационных оптико-электронных систем следует учитывать:

- монохромный характер и формат изображения;
- допускаемое снижение качества изображения;
- возможную полосу частот канала передачи;
- требуемую помехозащищённость передаваемой информации;
- возможность реализации скрытной передачи информации;

– сложность реализации аппаратуры на передающей и приёмной сторонах.

Выводы

Для обмена информацией в современных комплексах авиационных систем оптико-электронного мониторинга подстилающей поверхности широко применяются цифровые радиолинии.

В задачах, решаемых комплексами авиационных систем оптико-электронного мониторинга, применение методов сжатия форматов MPEG может привести к недопустимой потере информации.

Учитывая сказанное выше, а также необходимость аппаратной реализации кодека, для использования в бортовых системах комплексов оптико-электронного мониторинга целесообразно использовать формат сжатия JPEG. При этом, для реализации бортовой части кодека целесообразно использовать современные программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), а приёмную часть кодека реализовывать либо аппаратно, либо программно (в зависимости от вида пункта приёма информации).

Формат сжатия JPEG обеспечивает передачу видеоизображений без искажений при коэффициенте сжатия до 16 раз. При коэффициенте сжатия более 16 раз (С/Ш ≤ 30 дБ) начинают наблюдаться блочные артефакты. Однако, даже при коэффициенте сжатия 32 раз (С/Ш ≤ 27 дБ), изображение пригодно к дешифрированию, несмотря на наличие артефактов.

Литература

1. Евстигнеев В.Г., Лебедев В.Д., Кошарновский А.Н., Сухачев А.Б. К вопросу обеспечения передачи видовой информации в комплексах управления беспилотными летательными аппаратами // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. Выпуск 1. 2011. – С. 37-39.
2. Евстигнеев В.Г., Лебедев В.Д., Сухачев А.Б., Шапиро Б.Л. Современный взгляд на проблему повышения эффективности передачи видовой информации в комплексах управления беспилотными летательными аппаратами // Вопросы оборонной техники, серия 9. Выпуск 2(254)-3(255). – М.: ОАО «ЦНИИАГ», 2012. – С. 118-124.

3. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов. Практический подход. – М.: Вильямс, 2004. – 992 с.
4. STANAG 4609/AEDP-8. NATO Digital Motion Imagery Format. URL: www.nato.int/structur/AC/224/standard/4609/4609.htm.
5. Слюсар В. Электроника в борьбе с терроризмом: защита гаваней. Часть 1 // Электроника: НТБ, № 5. – М.: Техносфера, 2009. – С. 68-73.
6. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. – М.: Диалог-МИФИ, 2003. – 384 с.
7. Миано Дж. Форматы и алгоритмы сжатия изображения в действии. – М.: Триумф, 2003. – 336 с.

УДК 004

Смагин М.С., к.т.н., доц.

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПАРКА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Статья написана по итогам разработки перспективного плана развития одного из подразделений ЗАО «МНИТИ», а также аналитического обзора использования компьютерной техники в научных организациях России. В ходе указанной разработки и обсуждения её результатов с коллегами, занятыми разработкой специализированной аппаратуры для ответственного применения, выяснилось, что полученная информация и наработанный опыт могут быть полезны профильным специалистам различных предприятий при планировании развития информационных технологий.

Развитие технической и программной базы в большинстве научно-исследовательских организаций России осуществлялось близкими путями и прошло через ряд сходных этапов, и лишь время прохождения каждого из этапов для разных организаций было различным и определялось как наличием свободного финансирования, так и вниманием и интересом руководства к новинкам в области информационных технологий.

В целом историю освоения и распространения информационных технологий в российских научно-исследовательских организациях можно условно разбить на следующие этапы.

К начальному этапу можно отнести период с середины–конца 80-х до середины–конца 90-х годов XX века, когда научно-исследовательские организации только начали обзаводиться парком персональных компьютеров (ЭВМ), преимущественно зарубежного производства. Для данного периода характерно то, что, с одной стороны, сами персональные ЭВМ были весьма несовершенны и пригодны лишь для ограниченного числа задач, а с другой, – даже те возможности, которые они предоставляли, неадекватно оценивались в силу свойственного большинству людей консерватизма.

Фактически, на тот момент, помимо решения чисто расчётных математических задач, персональные компьютеры позволяли решать пусть и ограниченный, но всё же довольно широкий спектр графических и текстовых задач. Однако в таковом качестве они, как правило, не использовались. Как в силу того, что многие программные средства не имели русскоязычного интерфейса и не поддерживали работу с кириллицей, так и в силу упомянутого выше консерватизма.

Так, например, внедрение программного обеспечения (ПО) для ввода, разработки и редактирования схем часто останавливалось на фразе чертёжника: «Да я за своим кульманом быстрее всё нарисую». Причём объективно это соответствовало действительности, поскольку опытный чертёжник, как правило, работал быстрее неопытного пользователя компьютера, а всё удобство программных средств разработки схем проявлялось только на этапе их редактирования и отладки.

На первом этапе расширение парка персональных ЭВМ и арсенала ПО для них в научно-исследовательских организациях осуществлялось, в основном, усилиями энтузиастов, многие из которых принадлежали к сложившейся к тому моменту в России субкультуре пользователей персональных компьютеров.

Однако с течением времени парк персональных вычислительных средств рос, росло также количество и профессионализм их пользователей, а арсенал ПО постоянно расширялся и улучшался. Персональные ЭВМ были включены в существовавшие маршруты разработки научно-исследовательских организаций и стали играть в указанных разработках существенную роль.

С этого момента можно отсчитывать второй этап освоения и внедрения информационных технологий в научно-исследовательских организациях. Что касается временных границ, то к данному этапу можно отнести период со второй половины 90-х годов XX века до второй половины 2000-х.

Указанный этап можно назвать «этапом неквалифицированного пользования». Тому есть несколько причин, большинство из которых напрямую ни с вычислительной техникой, ни с ПО не связаны.

Во-первых, ввиду сравнительно невысокого уровня знаний большинства пользователей компьютеров о принципах работы и нюансах технических характеристик ЭВМ, аппаратные характеристики внедряемых машин выбирались по принципу «попросим подороже, всё равно купят подешевле», а характеристики компьютеров, предоставляемых отдельному сотруднику, определялись не выполняемыми им задачами, а значимостью сотрудника для руководства и для организации в целом.

Во-вторых, поскольку большая часть используемого ПО была «пиратской» (*т.е. ПО использовалось без лицензий или с их нарушением*), несмотря на множество положительных аспектов его применения, это несло с собой и несколько важных недостатков. К ним можно отнести чрезмерное расширение состава ПО, использовавшегося в научно-исследовательских организациях, а также применение программных средств не по их непосредственному профилю. Это, в свою очередь, приводило как к тому, что большая часть их функционала оставалась незадействованной, а сотрудники были загружены непроизводительными операциями, связанными с отказом от применения или принудительным отключением непрофильных функций ПО.

Так, к примеру, один из собеседников автора описывал применение в то время в одной из научно-исследовательских организаций программы Adobe Photoshop в качестве графического редактора для рисования электрических и функциональных схем. Другим негативным примером, также известным автору, является использование для решения одних и тех же задач различных несовместимых между собой программных средств, выбираемых в зависимости от вкуса и навыков конкретного сотрудника, что приводило к необходимости повторного ввода одних и тех же проектов при передаче дел от одного сотрудника к другому.

Третий этап, временные границы которого можно приблизительно поместить между серединой первого и серединой второго десятилетий XXI века, заключался, в основном, во внедрении сетей передачи данных как в части внутренних сетей научно-исследовательских организаций, так и в части их связи с сетью «Интернет».

Чаще всего, в целях сохранения коммерческой и государственной тайны, внутренние локальные сети научно-исследовательских предприятий не имели физической связи между собой. Для доступа к сети «Интернет», как правило, выделялись специализированные компьютеры, не имевшие физической связи с корпоративными локальными сетями, и находившиеся в коллективном пользовании в режиме разделения времени, нередко с ведением журналов доступа к машине.

Подобная практика позволяла обеспечить защиту от несанкционированного доступа ко внутренним данным предприятия, но, вместе с тем, повышала их уязвимость к программным вирусам, которые могли попасть в корпоративную сеть через портативные носители данных: дискеты, компакт-диски и флэш-накопители. Проблема была в том, что доступные в то время антивирусные средства, как правило, обновлялись через сеть «Интернет», и даже в тех случаях, когда компьютеры предприятия оснащались антивирусными программами, они быстро устаревали и не обеспечивали необходимой защиты данных.

Современный этап внедрения и эксплуатации информационных технологий в научно-исследовательских учреждениях можно условно назвать четвёртым. Для него характерен ряд принципиально важных особенностей и тенденций, которые подробно рассмотрены ниже.

Первое, что надо отметить, учитывая вышесказанное, это фактическая необходимость обеспечения доступа всех персональных компьютеров организации в сеть «Интернет». В настоящее время это обусловлено не только требованиями к обновлению антивирусных программ, но и необходимостью постоянного обновления большинства программных средств и даже системного ПО самих компьютеров (операционных систем), а также тем, что многие современные специализированные прикладные программы требуют подключения к сети «Интернет» для контроля производителем наличия лицензии, а в случае отсутствия такого подключения просто не запускаются.

Причина заключается в том, что производители вычислительной техники и ПО всемерно стараются сократить время выхода новой продукции на рынок, а также снизить расходы на их разработку. В связи с этим сокращаются временные и финансовые расходы на службы контроля качества, функции которых фактически перекладываются на пользователя. Более того, оперативная реакция на заявки пользователей об обнаружении неисправностей, парадоксальным образом способствует улучшению имиджа разработчиков, как открытых к критике и работающих в плотном контакте с пользователями.

Вторая важная тенденция – это растущее расширение номенклатуры и непрерывное совершенствование бесплатного ПО. Одним из известных примеров подобного рода является бесплатный пакет офисных программ LibreOffice (*создан на основе OpenOffice*), являющийся близким аналогом коммерческого пакета Microsoft Office.

Помимо технического аспекта, важную роль в данном случае играет юридический вопрос, поскольку многие бесплатные программные средства допустимы к использованию исключительно в некоммерческих целях.

На сегодняшний день значительная часть типовых задач, решаемых в научно-исследовательских организациях, таких как разработка текстовой и графической документации, выполнение сложных расчётов, разработка программных продуктов и т. д. может быть полностью, или почти полностью, решена с помощью бесплатных программных средств, работающих, например, под управлением бесплатной и свободно распространяемой операционной системы Linux, при этом большинство из них имеет версии и для коммерческой операционной системы Microsoft Windows.

Продолжая обзор, нельзя не сказать о сверхактуальном в настоящее время курсе на повсеместное импортозамещение и переход на отечественную продукцию. Применительно к средствам вычислительной техники и ПО, импортозамещения можно достигнуть как в части аппаратных средств (здесь компьютеры на базе процессоров «Эльбрус» практически безальтернативны), так и в части программных продуктов. В последнем случае речь идёт о различных отечественных версиях операционной системы Linux (Astra Linux, Rosa Linux и т. д.), а также довольно широком спектре прикладных программ, относительно полный список которых можно найти, к примеру, на Интернет-сайте http://russian-programms.ru/.

Последней по списку, но не по значению, является тенденция к общему усовершенствованию и расширению функциональных возможностей современных программных средств. Магистральной идеей в данном случае является максимальная автоматизация рутинных операций, связанных с разработкой научно-технической, конструкторской, технологической и программной документации, а также обеспечение возможности её коллективной разработки.

Примерами подобного ПО может служить программный комплекс «Асоника», обеспечивающий автоматический расчёт и генерацию карт рабочих режимов, а также системы автоматизации и коллективной разработки текстовой документации, например, система управления базами данных «TDMS» или системы на базе текстового процессора LaTeX.

Указанные системы обеспечивают возможность автоматизации расчётов маршрутных карт, сведения в единые тома документов большого объёма при их коллективной разработке, освобождение пользователя от однообразных операций, таких как нумерование разделов, рисунков, таблиц и т. д.

О разработке программной документации следует сказать особо, поскольку, помимо упомянутых выше операций, там имеется ряд специфичных рутинных действий, которые также могут быть автоматизированы. В первую очередь к таким действиям относится тестирование и поиск ошибок. В настоящее время программные системы, обеспечивающие автоматизацию подобных действий, называются системами контроля версий и системами постоянной интеграции.

Системы контроля версий позволяют фиксировать изменения в разрабатываемом ПО и незаменимы как при поиске ошибок в коде, так и при написании нового кода. Также систему контроля версий можно использовать как систему резервного копирования, потому что, при правильном использовании, в системе будет зафиксирован код на всех этапах разработки. В любой момент есть возможность «откатиться» (*вернуться*) к любой предыдущей версии разрабатываемого ПО.

Использование систем постоянной интеграции позволяет быстрее и проще выявлять ошибки в разрабатываемом программном обеспечении. С помощью некоторого набора проверок и тестов, которые составляет разработчик, система

после каждой сборки проверяет программный код и сообщает о найденных ошибках.

Актуальными задачами текущего этапа освоения информационных технологий в интересах научно-исследовательских организаций является внедрение описанного ПО в текущие маршруты проектирования, а также обеспечение безопасности работы локальных компьютеров и сетей передачи данных научно-исследовательских предприятий в условиях необходимости их подключения к сети «Интернет».

В ЗАО «МНИТИ» постоянно ведётся работа по мониторингу и сбору информации о современном состоянии и возможностях средств вычислительной техники и ПО отечественного и зарубежного производства. Наиболее подходящие решения подвергаются детальному анализу и внедрению в повседневную научно-техническую практику института.

Литература

1. Пиратское ПО в России и мире. Нелицензионное ПО [Электронный ресурс]. URL: http://www.tadviser.ru/.
2. Бесплатные аналоги платных программ [Электронный ресурс]. URL: http://freeanalogs.ru/.
3. Русские программы – Продаем и внедряем [Электронный ресурс]. URL: http://russian-programms.ru/.
4. Асоника | Главная страница [Электронный ресурс]. URL: http://asonika.ru/.
5. LaTeX – A document preparation system. URL: https://www.latex-project.org/.

УДК 517

Ковтун И.И., к.т.н., доц.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ОПЫТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

В статье обозначены проблемы планирования опытного производства. Представлены основные направления исследования, цель которого – решение обозначенных проблем посредством интеграции в рамках одной методики известных методов математического программирования и методов сбора исходных данных, разработанных в рамках методологии функционального моделирования IDEF0.

Опытное производство – это производство образцов, партий или серий изделий для проведения исследовательских работ или разработки конструкторской и технологической документации для установившегося производства, т.е. производства по окончательно отработанной технологической и конструкторской документации [1]. Как правило, опытное производство является единичным или мелкосерийным.

Детальное исследование различных точек зрения на опытное производство в современных условиях представлено в [2]. Проделанный в указанной работе анализ позволяет сделать вывод об опытном производстве как особом типе производства, выделяемом в составе промышленного предприятия как в соответствии с постановлением правительства Российской Федерации, приказом регулятора, так и по собственной инициативе для обеспечения научно-технического прогресса и развития промышленности страны. Основными задачами опытного производства, при этом, являются:

- проектирование и разработка новых видов техники, технологий и продукции;
- изготовление, испытание и доведение до серийного производства современных, оригинальных, уникальных опытных образцов с заданными или превосходящими технико-экономическими характеристиками в условиях, максимально приближенных к промышленным;
- изготовление специального оборудования для проведения новых научных исследований и разработок.

На предприятиях оборонно-промышленного комплекса за организацию опытного производства традиционно отвечает одноименное структурное подразделение [3, 4].

Как правило, для опытного производства характерны следующие особенности.

1. Изготовление изделий происходит в единичном экземпляре, с повторением через неопределённые промежутки времени или однократно, вследствие чего затраты на разработку детального, т.е. пооперационного, технологического процесса экономически не оправданы.
2. Изготовление оригинальных деталей происходит на универсальном оборудовании с применением универсальных или специально разработанных приспособлений. Поскольку изготовление специальной оснастки для обработки заготовок с малыми припусками в условиях опытного производства неэкономично, заготовки поступают с большими припусками на обработку, что приводит к высокой трудоёмкости и себестоимости опытных образцов.
3. Сложность детальной проработки технологического процесса, использование универсального оборудования и приспособлений предопределяют необходимость привлечения опытных рабочих высокой квалификации.
4. Согласование времени и порядка выполнения отдельных технологических операций при большом числе разнообразных деталей представляет большую трудность. В таких условиях, как правило, применяется последовательный порядок перемещения деталей, что вызывает длительное ожидание выполнения каждой последующей технологической операции. Однако, наблюдается и параллельное, встречное и перекрещивающееся движение деталей, приборов и устройств.
5. Одновременное нахождение в процессе производства большого количества разнообразных изделий, зачастую не повторяющихся, усложняет оперативное руководство производственными процессами и побуждает руководство предприятия к его децентрализации.

6. Сложности применения специального оборудования и приспособлений приводят к увеличению доли немеханизированного труда и, как результат, к сравнительно низкой производительности.

Основой планирования любого производства является организация и обеспечение производственного процесса на уровне наибольшей производительности. Учитывая вышеизложенное, важной составляющей планирования опытного производства является постановка и решение задач оптимального распределения ресурсов в течение планируемого периода в заданных условиях, в т.ч. с учётом предполагаемого к производству количества изделий по каждой из номенклатур [6]. Как результат, поиску оптимальных решений в процессе распределения ресурсов с учётом многофункциональности оборудования, затрат на производство и требований к плану производства посвящён ряд научных работ, в т.ч. [7-9].

Одним из наименее исследованных проблемных вопросов, при этом, является вопрос интеграции в рамках единого комплексного подхода чётких алгоритмов поиска, сбора и первичной обработки исходных данных для построения адекватных математических моделей, с одной стороны, и представленных в указанных работах методов решения задач математического программирования, с другой.

Одновременно практический опыт показывает, что формирование итогового суждения о составе и количестве необходимых ресурсов в течение планируемого периода может сильно варьироваться в зависимости от диапазона и качества исходных данных, предоставленных для оценивания. Одной из существенных проблем, возникающих в процессе получения таких исходных данных, является наличие субъективного фактора в процессе их сбора. Многократное недокументированное общение между системными аналитиками и представителями заказчика, между системными аналитиками и цеховыми мастерами, технологами, как правило, является значительной предпосылкой к формированию неверных суждений о различного рода ресурсах, необходимых для организации опытного производства. Недостоверная информация приводит к построению неадекватно сформулированных, зачастую смещённых, математических моделей, применение которых не способствует достижению существенных практических выгод.

Как результат обозначенных проблем – руководство предприятия не видит необходимости в применении строгих математических процедур в процессе принятия решений и больше полагается на экспертное оценивание или интуицию. Как известно, при принятии решения в условиях слишком большого количества необходимых к учёту факторов и обстоятельств, т.е. в условиях, характерных для опытного производства, повышается вероятность умозаключений, противоречащих собственным суждениям и предпочтениям [10]. Следовательно, такой подход, может привести к неверным выводам, как результат, негативно отразиться на динамике производства и, в конечном счёте, создать предпосылки к возникновению задержек и срыву сроков выполнения этапов государственных контрактов и договоров с заказчиками.

Как известно, с целью повышения достоверности исходных данных, особенно с развитием компьютерной техники, в процессе обследования предприятий всё большее применение находят функциональные модели и основанные на них методологии (методики) описания информационных, материальных и финансовых потоков, в т.ч. функциональная модель IDEF0 [11]. Модель IDEF0 явилась дальнейшим развитием графического языка описания систем SADT и была утверждена в качестве стандарта в рамках проведенной в США программы автоматизации промышленных предприятий ICAM. При этом, одним из требований к стандарту, кроме усовершенствованного набора функций для описания, было наличие эффективной методологии взаимодействия системных аналитиков и других специалистов, занятых в рамках проекта. В Российской Федерации модели IDEF0 и основанной на ней одноименной методологии также уделено серьезное внимание [12]. Как результат, на отечественном рынке появляется всё больше программных пакетов, CASE-средств, которые служат для автоматизации процесса проектирования и разработки автоматизированных систем, например, средства проектирования Bpwin компании Platinum Technologies, Microsoft Office Visio компании Microsoft, в основу которых положена IDEF0 и другие функциональные модели.

IDEF0-модель обследуемого предприятия представляет собой совокупность иерархически упорядоченных и взаимосвязанных диаграмм, информация на которых представлена в графическом виде. Основными конструктивными элементами, при этом, являются функциональные блоки и

интерфейсные дуги. Функциональные блоки отображаются в виде прямоугольников и обозначают поименованные процессы, функции или задачи, реализация которых имеет чётко распознаваемый результат.

Интерфейсные дуги представляют сущности обследуемого предприятия, которые необходимы в ходе выполнения функций, представленных функциональными блоками. Такими сущностями могут быть как станки, детали, специалисты, так и договора, электронные документы, инструкции. Графически интерфейсная дуга отображается в виде однонаправленной стрелки и, в зависимости от стороны функционального блока, к которой примыкает, носит название входящей, исходящей, управляющей или стрелки механизма. Управляющая интерфейсная дуга примыкает к верхней грани функционального блока, и обозначает договор, тактико-техническое задание, стандарт, иной руководящий документ или правило, которым необходимо руководствоваться в процессе выполнения функции, представленной функциональным блоком. Стрелка входа примыкает к левой грани функционального блока и обозначает необходимый для выполнения работы ресурс. Стрелка выхода, в свою очередь, исходит из правой грани и обозначает изделие, материал или документ, который возникает в процессе работы. Интерфейсная дуга механизма предназначена для отображения объекта, который выполняет работу, например, контрагента, структурного подразделения, сотрудника предприятия и т.п. Стрелка механизма примыкает к нижней грани функционального блока. С каждой гранью функционального блока может быть связано несколько стрелок, стрелки могут быть разветвляющимися и сливающимися, а также граничными, т.е. один конец которых примыкает к границе диаграммы. С помощью граничных стрелок определяется порядок взаимодействия обследуемого предприятия с внешней средой.

Реализованный в методологии IDEF0 принцип декомпозиции позволяет представить обследуемое предприятие в виде иерархической структуры взаимосвязанных диаграмм, что делает модель такого предприятия менее перегруженной. Разработка модели IDEF0 всегда начинается с представления обследуемого объекта как единого целого – одного функционального блока с примыкающими к нему граничными интерфейсными дугами. Такая диаграмма называется контекстной. В процессе декомпозиции функциональный блок контекстной диаграммы подвергается детализации на другой диаграмме.

Полученная диаграмма, диаграмма второго уровня, содержит функциональные блоки, отображающие главные подфункции функционального блока контекстной диаграммы, и называется дочерней по отношению к нему. При этом, каждый из функциональных блоков, принадлежащих дочерней диаграмме, соответственно называется дочерним по отношению к детализируемому функциональному блоку, и, в свою очередь, может быть детализирован аналогичным образом. Примеры построения диаграмм IDEF0 приведены в [12].

Методология IDEF0, в свою очередь, предполагает скоординированную коллективную работу, при которой разработчики модели – авторы создают первоначальные диаграммы, основанные на собранной информации об объекте моделирования, и передают их другим участникам проекта для рассмотрения и формулирования замечаний. Затем эксперты, имеющие замечания к диаграммам, делают их письменно и передают авторам. Этот цикл продолжается до тех пор, пока диаграммы, а затем и вся модель, не будут утверждены. Ценность модели, при этом, определяется её приемлемостью для экспертов, которая достигается следующим.

1. Постоянным рецензированием экспертами развивающейся модели, что обеспечивает необходимый уровень её адекватности существующему объекту моделирования, в случае если модель отражает состояние «Как есть» (англ.: «AS-IS»), или предполагаемому, если модель отражает состояние «Как должно быть» (англ.: «TO-BE») в том понимании, которое соответствует мнению экспертов.
2. Периодическим обсуждением диаграмм, частей модели и модели в целом на научно-техническом совете, решение которого, оформленное в виде протокола, позволяет авторам продолжить уточняющее моделирование или закончить его ввиду достаточности детализации и приемлемости.

Принимая во внимание вышеизложенные факторы, можно сделать вывод о том, что систему поиска, сбора и обработки исходных данных для задач оптимизации опытного производства целесообразно рассмотреть как процесс построения состояния «TO-BE» функциональной модели IDEF0, при котором, с целью повышения качества рецензирования, эксперты неоднократно

(итерационно) решают такие задачи, применяя известные методы оптимизации ресурсов.

Полученный вывод ставит вопрос об адаптации известных математических моделей, предназначенных для оптимизации производственных процессов, к нотации функциональной модели IDEF0.

Способ такой адаптации можно показать на примере задачи оптимизации распределения оборудования с учётом его многофункциональности, затрат на производство и требований к плану производства [13]. Вербальное описание указанной задачи имеет следующий вид.

Зная:

- перечень типов оборудования;
- перечень видов продукции;
- объёмы производства продукции каждого вида;
- стоимость сырья;
- расход ресурса (материалов) при производстве единицы продукции заданного вида с использованием оборудования выбранного типа;
- стоимость единицы расходуемого ресурса при производстве единицы продукции заданного вида с использованием оборудования выбранного типа;
- лимит ресурса, установленный для оборудования каждого типа в отчётном периоде;

найти:

- доли продукции каждого вида, планируемые к производству с использованием оборудования каждого типа, при которых суммарные затраты на производство заданного количества продукции всех видов будут минимальны.

Ниже эта задача сформулирована в нотации IDEF0, затем приводится построение её математической модели.

Дано:

m – количество рассматриваемых механизмов (типов оборудования);

n – количество функциональных блоков в рассматриваемом родительском блоке (видов продукции). Настоящая модель предполагает, что реализация функции, представленной функциональным блоком, будет приводить к

созданию единицы продукции заданного вида. В целом это может быть и не так – более сложная математическая модель (2) рассматривается далее;

$C_j,\ j = \overline{1,n}$ – число повторений *j-той* функции в рамках родительского блока (объём производства продукции *j-того* вида);

p_j – предварительные затраты на реализацию *j-той* функции, в т.ч. стоимость сырья и т.п.;

d_{ij} – расход ресурса при реализации *j-той* функции с использованием *i-того* механизма;

k_{ij} – стоимость единицы расходуемого ресурса при реализации *j-той* функции с использованием *i-того* механизма;

$D_i,\ i = \overline{1,m}$ – лимит ресурса, установленный для *i-того* механизма в отчётном периоде.

При этом

$$a_{ij} = p_j + k_{ij}d_{ij},$$

где a_{ij} – стоимостные затраты на реализацию *j*-той функции с использованием *i*-того механизма.

Найти:

x_{ij} – планируемое количество повторений *j-той* функции *i-тым* механизмом, при котором целевая функция

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_{ij}$$

достигает минимума.

Решение

Для решения этой задачи её можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_{ij} \to min \\ \sum_{j=1}^{n} d_{ij}x_{ij} \le D_i, \;\; i = \overline{1,m} \\ \sum_{i=1}^{m} x_{ij} = C_j, \;\; j = \overline{1,n} \\ x_{ij} \ge 0, \;\; i = \overline{1,m}, \;\; j = \overline{1,n} \\ x_{ij} \in Z, \;\; i = \overline{1,m}, \;\; j = \overline{1,n} \end{cases} \qquad (1)$$

В задаче (1) ограничения первой группы моделируют ограничения на ресурс оборудования, а ограничения второй группы гарантируют выполнение плана заказов.

Сформулированная указанным образом задача оптимизации является распределительной задачей линейного программирования [9], решение которой сводится к транспортной задаче [8].

Конец задачи

Применение реляционной модели [14-16] в качестве метамодели для модели IDEF0 (Рисунок 1) обеспечивает возможность практической реализации предлагаемого подхода к сбору и обработке исходных данных для решения задач математического программирования с помощью любой коммерческой реляционной системы управления базами данных, например, Oracle, Microsoft SQL Server, Ingress, Informix, Sybase и др.

Уместно отметить, что база данных, имеющая структуру в соответствии с рисунком 1, не в полной мере подходит для сбора и хранения исходных данных, необходимых в процессе решения задач (1) и (2). Так, например, невозможно организовать хранение показателей d_{ij}, k_{ij}, где $i = \overline{1,m}; j = \overline{1,n}$. Тем не менее, представление функциональной модели IDEF0 в рамках реляционной позволяет использовать все достоинства последней, в т.ч. одно из главных – простоту развития и сопровождения. Так, в случае возникновения необходимости хранения показателей d_{ij}, k_{ij} потребуется введение дополнительной таблицы, которая будет связана отношениями «многие ко многим» [16] с таблицами функциональных блоков и интерфейсных дуг.

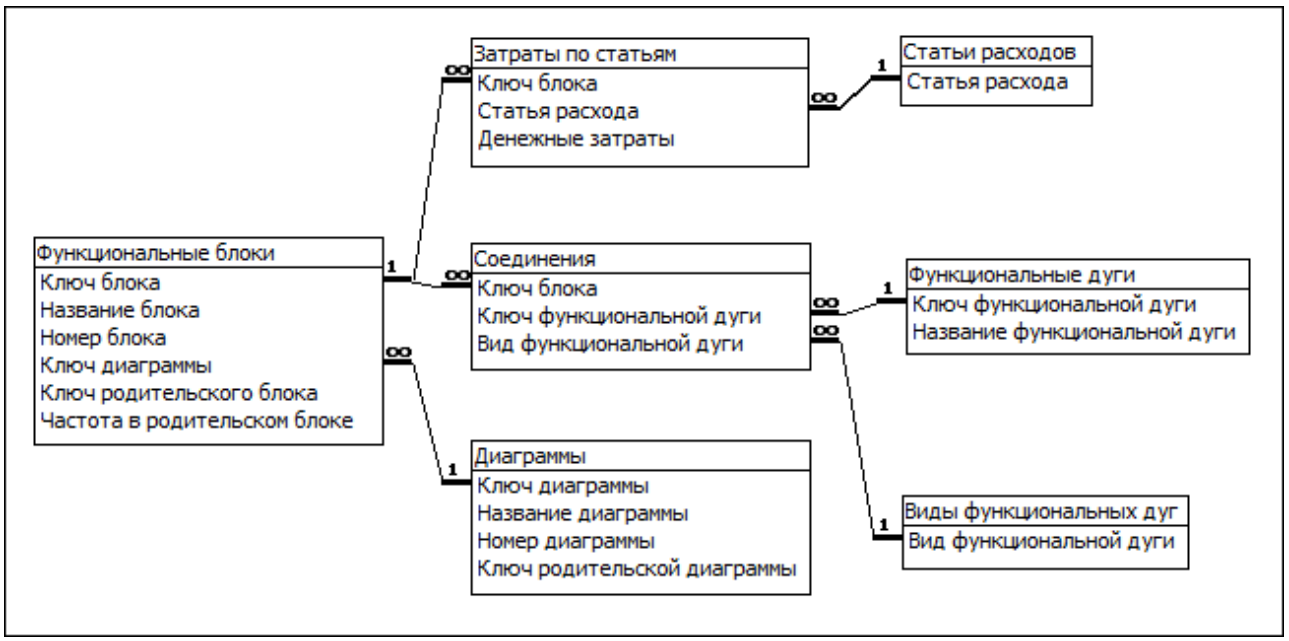


Рис. 1. Модель IDEF0, представленная реляционной моделью.

Рассмотренная модель планирования занятости оборудования (1) приемлема в процессе организации производства относительно простых изделий, изготовление которых не требует реализации большого количества разнотипных технологических операций. В процессе опытного производства, однако, вследствие того, что каждый станок, как правило, является многофункциональным и, после соответствующей переналадки, может выполнять необходимые технологические операции для изготовления продукции различных видов, а продолжительность переналадки зависит от того, с продукции какого вида, и на какой, осуществляется переналадка, зачастую возникают более сложные ситуации. В таких случаях необходимо учитывать производительность оборудования, в т.ч. станков, специальных приспособлений и т.п., различных типов при выполнении отдельных технологических операций для изготовления продукции каждого вида. Важнейшей задачей такого производства является рациональное назначение оборудования для выполнения суммарного объёма технологических операций.

Адаптируем к функциональной модели IDEF0 задачу формирования оптимального плана распределения оборудования, см. [13], сформулированную с учётом указанных обстоятельств. Вербальное описание такой задачи имеет следующий вид.

Зная:

- перечень оборудования;
- перечень видов продукции;
- перечень технологических операций, которые необходимо выполнить при изготовлении продукции каждого вида;
- производительность выполнения каждой операции на каждом станке в процессе изготовлении продукции каждого вида;

найти:

- производственный план (технологические операции, выполняемые на каждой единице оборудования для изготовления продукции каждого вида), максимизирующий в течение заданного интервала времени суммарный объём выпуска.

Ниже поставленная задача формулируется в нотации IDEF0, затем приводится построение её математической модели. Заметим, при этом, что в данном случае, в отличие от математической модели (1), механизм целесообразно поставить в соответствие единице оборудования, а функциональный блок – технологической операции. При этом, для идентификации продукции определённого вида, ему в соответствие целесообразно поставить подграф графа функциональных блоков и связывающих их интерфейсных дуг. Для этого каждый такой подграф необходимо окрасить цветом $k, k = \overline{1,p}$. Практическая реализация окрашивания, при этом, приведёт к необходимости доработки реляционной модели, представленной на рисунке 1, фрагментом, представленным на рисунке 2.

Дано:

m – количество рассматриваемых механизмов;

k – количество рассматриваемых видов продукции (подграфов);

n_k – количество функций, которые необходимо выполнить при изготовлении продукции k-го вида;

$I = \{1, 2, \dots, m\}$ – множество номеров механизмов;

$K = \{1, 2, \dots, p\}$ – множество видов продукции;

$J_k = \{1, 2, \dots, n_k\}$ – множество функций, которые необходимо реализовать в процессе изготовления продукции *k-го* вида;

η_{ijk} – производительность выполнения *j*-той функции *i*-тым механизмом при изготовлении продукции *k-го* вида, определяемая числом выполненных функций в течение заданного интервала времени.

Здесь можно ввести булеву переменную:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, i = \overline{1,m}; j \in J_k; k = \overline{1,p} \\ 0, \text{иначе} \end{cases}.$$

Тогда:

$$B_{jk} = \sum_{i=1}^{m} x_{ijk}\eta_{ijk}$$

есть суммарная производительность совокупности механизмов, выполняющих *j*-тую функцию при изготовлении продукции *k-го* вида;

$$B_k = \min_{j \in J_k}\{B_{jk}\} = \min_{j \in J_k}\{\sum_{i=1}^{m} x_{ijk}\eta_{ijk}\}$$

есть производительность изготовления продукции *k-го* вида при реализации производственного плана $x = \{x_{ijk}\}$.

Требуется найти

Производственный план $x = \{x_{ijk}\}$, максимизирующий в течение заданного интервала времени суммарный объём выпуска, определяемый следующим выражением:

$$\sum_{k=1}^{p} \min_{j \in J_k}\{\sum_{i=1}^{m} x_{ijk}\eta_{ijk}\}.$$

Решение

Данная задача может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{p} \min_{j \in J_k} \{ \sum_{i=1}^{m} x_{ijk} \eta_{ijk} \} \to max \\ \sum_{k=1}^{p} \sum_{j=1}^{n_k} x_{ijk} \leq 1, \;\; i = \overline{1,m} \\ \sum_{i=1}^{m} x_{ijk} = 1, \;\; j = \overline{1,n_k}; k = \overline{1,p} \\ x_{ijk} = \begin{cases} 1, i = \overline{1,m}; j \in J_k; k = p \\ 0, \text{иначе} \end{cases} \end{cases} \qquad (2)$$

Смысл первой группы ограничений состоит в следующем – каждый станок в любой момент времени может быть назначен для выполнения только одной технологической операции при изготовлении продукции только одного вида. Смысл второй группы ограничений – для продукции каждого вида все технологические операции должны быть выполнены.

Сформулированная указанным образом задача оптимизации (2) является несимметричной трёхиндексной нелинейной задачей о назначении с системой линейных ограничений. Точное решение такой задачи может быть получено методами целочисленного программирования [17-18].

Конец задачи

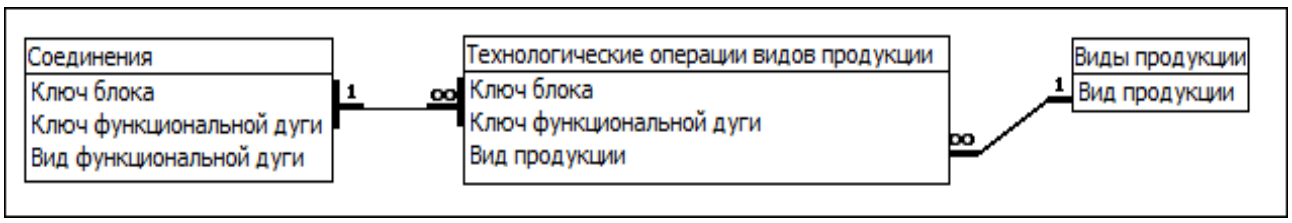


Рис. 2. Пример развития модели IDEF0, позволяющий окрашивать подграфы функциональных блоков и интерфейсных дуг, соответствующие технологическим цепочкам, выполняемым при изготовлении различных видов продукции.

Сравнительный анализ задач планирования занятости оборудования (1) и (2) показывает, что задача (2) позволяет получить более точные результаты. Однако, следует отметить, что количество затрачиваемых при этом усилий возрастает. Во-первых – необходимо решить более сложную задачу оптимизации, во-вторых – для сбора исходных данных для её решения может потребоваться создание дополнительного иерархического уровня диаграмм

функциональной модели IDEF0, в третьих – для практической реализации процесса сбора, хранения и отображения полученной информации необходимо организовать банк данных с более сложной структурой как базы (см. рисунки 1 и 2), так и пользовательского интерфейса.

Учитывая вышеизложенное, целесообразно скорректировать сделанный в начале настоящей статьи вывод – систему поиска, сбора и обработки исходных данных для задач оптимизации опытного производства целесообразно рассмотреть как оперативный, автоматизированный процесс построения состояния «TO-BE» функциональной модели IDEF0, при котором эксперты, применяя известные методы оптимизации ресурсов, итерационно решают такие задачи в следующих целях:

- с целью принятия решения о необходимости дальнейшей коррекции и детализации модели;
- с целью принятия итогового решения в отношение модели опытного производства на планируемый период.

Примечание: более весомый практический результат, вероятно, может быть получен вследствие интеграции модели IDEF0, методов оптимизации ресурсов, а также методов теории принятия решений, в т.ч. методов принятия решений в условиях неопределённости, методов принятия решений в условиях риска, методов экспертных оценок [10]. Детальное рассмотрение данного вопроса является предметом дальнейших исследований и выходит за рамки настоящей статьи.

Весомым доводом в пользу применения доработанной предлагаемым в настоящей статье способом методологии IDEF0 в качестве системы поиска, сбора и обработки исходных данных для задач оптимизации опытного производства является следующий факт. В ходе модернизации и развития производственных процессов, как правило, одновременно с такими задачами приходится решать ряд других, не менее актуальных проблем, в т.ч. оценивать реализуемость проектов, определять облик проектируемой автоматизированной системы управления производственными процессами и т.п. Необходимость решения указанных проблем побуждает экспертную группу дополнительно отвечать на следующие вопросы:

– какая информация имеется / может быть получена по финансированию опытного производства в будущем;
– какая информация имеется / может быть получена по составу оборудования в будущем;
– какая информация имеется / может быть получена по поставкам сырья для организации производства в будущем;
– какая информация имеется / может быть получена по расходам на производство в будущем;
– какие требования предъявляются к степени проработки задач, связанных с планированием опытного производства.

С целью получения аргументированных ответов на указанные вопросы в процессе сбора и обработки информации предлагаемое решение позволяет применить системный, комплексный подход. При этом, особенности применения функциональных моделей в процессе проектирования автоматизированных систем управления предприятием доложены в [19].

Нельзя, однако, не отметить следующую сложность практической реализации предлагаемой методики. С большей вероятностью, в процессе сбора данных экспертной группе придётся реагировать на типичные возражения руководства относительно использования моделей (1) и (2). Хотя такие возражения могут формулироваться по-разному, их суть будет сводиться к следующему – «… но у нас ведь нет таких данных …». В таком случае, в качестве контраргумента, целесообразно привести довод, указанный в [17], а именно, исследование операций обычно связано с принятием таких решений, которые уже неоднократно принимались в прошлом. Отсутствие соответствующих данных просто означает, что эти решения принимались и принимаются без должного обоснования. Поэтому трудности получения необходимых данных не являются препятствием к выполнению продуктивных операционных исследований. Если даже в качестве требуемых входных данных используются оценки на уровне догадок, результаты исследования, вероятно, всё же будут способствовать улучшению существующих методов управления. И даже без таких оценок результаты исследования могут помочь сфокусировать внимание руководства на наиболее спорных моментах существующего процесса принятия решений и рекомендовать ему более строгие процедуры логической оценки альтернативных вариантов.

Литература

1. ГОСТ 14.004-83. Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий.
2. Ширяева Ю.С., Оранова М.В. Современный взгляд на опытное производство и механизм управления им на промышленном предприятии // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, № 6. – Нижний Новгород, 2007. – С. 197-200.
3. Постановление ГКНТ СССР от 17.02.1984 № 59 «Об утверждении Положения об опытном (экспериментальном) предприятии, в том числе, входящем в состав производственного, научно-производственного объединения, научно-исследовательской, конструкторской, проектно-конструкторской и технологической организации».
4. Официальный сайт акционерного общества «Опытное производство «Алмаз» [Электронный ресурс]. URL: http://www.pvoproiz.ru/.
5. ГОСТ 3.1121-84. Единая система технологической документации. Общие требования к комплектности и оформлению комплектов документов на типовые и групповые технологические процессы (операции).
6. Мясникова О.В. Инструменты организационно-экономического механизма совершенствования производственной бизнес-системы путем оптимизации производственных процессов: реинжиниринг // Экономика и управление, № 1, 2011. – С. 51-57.
7. Ханк Д.Э., Уичерн Д.У., Райтс А. Дж. Бизнес-прогнозирование: пер. с англ. 7-е изд. – М.: Вильямс, 2003. – 656 с.
8. Таха Х.А. Введение в исследование операций: пер. с англ. 7-е изд. – М.: Вильямс, 2005. – 912 с.
9. Серая О.В. Распределительная задача линейного программирования // Математические методы и модели, № 2(109). – М., 2013. – С. 167-170.
10. Орлов А.И. Теория принятия решений. Учебное пособие. – М.: Март, 2004. – 656 с.
11. Integration Definition for Function Modeling (IDEF0). Draft Federal Information Processing Standards Publication 183, 1993 December 21.

12. РД 50.1.028-2001. Методология функционального моделирования IDEF0. Руководящий документ. Издание официальное. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. – 75 с.
13. Алдошин В.М., О.А. Козелков. Системный анализ реализуемости проектов производства новой техники: монография. – М.: Триумф, 2015. – 208 с.
14. E.F. Codd. 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 (January 1983).
15. Мейер Д. Теория реляционных баз данных: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 608 с.
16. Мартин Дж. Организация баз данных в вычислительных системах. – М.: Мир, 1980.
17. Исследование операций: В 2-х томах. Т.1. Пер с англ. / Под ред. М. Моудера, С. Элмаграби. – М.: Мир, 1981.
18. Дегтярев Ю.И. Методы оптимизации. Учебное пособие для студентов ФПМ. – М., 1973.
19. Барсуков А.Г., Ковтун И.И. Формальный аппарат функционально-реляционного проектирования автоматизированных систем / Научно-технический сборник Техника средств связи. Серия: Техника телевидения. – М.: ЗАО «МНИТИ», 2017. – С. 178-190.

Для заметок