ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«МНИТИ»

МОСКОВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ ИНСТИТУТ

ТЕХНИКА СРЕДСТВ СВЯЗИ

Серия: ТЕХНИКА ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Научно-технический сборник

Москва
2016 год

УДК 621.397
ББК 32.94
Т381

Главный редактор: к.т.н. Вилкова Н.Н.

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

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

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

Техника средств связи. Серия: Техника телевидения. // Научно-технический сборник. – Москва : ЗАО «МНИТИ», 2016. – 129 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», 2016 г.
Отпечатано в ЗАО «МНИТИ»

СОДЕРЖАНИЕ

Вилкова Н.Н., Быструшкин К.Н. Роль и место ЗАО «МНИТИ» на этапе перехода России к цифровому телевидению 3-го поколения ……..……..… 4

Кукк К.И. Системы хранения телевизионной информации ……..…… 17

Бухалёв В.А., Болдинов В.А., Сухачев А.Б., Шапиро Б.Л, Перчаткин Н.А. Помехоустойчивый алгоритм обработки информации координатора объекта …….…… 21

Сагдуллаев Ю.С., Ковин С.Д. Способы объединения разноспектральных изображений …….…….…..…... 29

Шахрай В.И., Арзуманян Э.П. Исследование методом математического моделирования одного способа подготовки эталона в корреляционных системах автосопровождения ……...……...….. 42

Сухачев А.Б., Шапиро Б.Л., Перчаткин Н.А. Вероятностная модель процедуры обмена информацией по радиоканалу в системе управления БЛА ….. 54

Травина Е.И., Шахрай В.И. Повышение устойчивости слежения за протяженными объектами с использованием реперного алгоритма автосопровождения …….....… 65

Шулешкин А.П., Шахрай В.И. Экспериментальные исследования модуля приема-передачи данных с кодеком ШПС преобразования ……...…… 77

Королев Д.Е., Соколов И.С. Разработка MJPEG кодера на базе микропроцессора 1892ВМ10Я …… 85

Алимов А.Е., Шавкунов О.В. Оптимизация параметров цветоделительной системы для использования со светосильными объективами ..……....… 94

Шевчук А.А. Особенности формирования цветового тона для визуального анализа разноспектральных изображений …….....… 102

Пахомов С.Н. Малогабаритный привод для телевизионных систем ……..… 112

Дзюба В.И., Егоренко А.С. О методике контроля вероятности выполнения заданных функций ……..……... 124

УДК 621.397

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

РОЛЬ И МЕСТО ЗАО «МНИТИ» НА ЭТАПЕ ПЕРЕХОДА РОССИИ К ЦИФРОВОМУ ТЕЛЕВИДЕНИЮ 3-го ПОКОЛЕНИЯ

Современный этап развития отечественного телевидения является одним из наиболее сложных на протяжении его 85-летней истории.

В России в соответствии с последней редакцией ФЦП «Развитие телерадиовещания в Российской Федерации на 2009-2018 годы» окончание строительства сети наземного цифрового телевидения DVB-T2 должно завершиться к исходу 2018 года. Несмотря на отсутствие каких-либо директивных указаний, аналоговое эфирное телевещание в России может быть отключено сразу после этой даты решением самих телеканалов на фоне сложной финансовой ситуации и в условиях прекращения государством субсидирования их деятельности по данному направлению. Однако 2018 год станет ключевой вехой в развитии телевизионных технологий благодаря другому событию.

В этом году по прогнозам экспертов в мире начнется переход к новому, уже 3-му поколению цифрового телевидения: ATSC-3 (США), DVB-3 и Next Generation TDMB (Китай).

Все эти системы предусматривают переход на принципиально более высокий уровень качества изображения и звука (разрешение ультравысокой четкости UHDTV (4K)), а также широкое внедрение интерактивных сервисов и персонализацию передачи контента зрителям, в том числе посредством внедрения на практике:

- высокоэффективного стандарта кодирования H.265;
- технологии увеличенного динамического диапазона яркости видеосигнала HDR и расширенного цветового пространства видеосигнала;
- формата HFR с повышенной частотой смены кадров;
- аппаратно-программных решений с поддержкой технологии «окружающего» многоканального звука Dolby Atmos («immersion») и др.;
- решений, направленных на дальнейшее развитие технологий Smart TV и интернет-сервисов на основе высокоскоростных проводных и беспроводных сетей OTT и HbbTV;

- решений, обеспечивающих интеграцию телевизионных приемников в беспроводные домашние информационные сети LAN, а также поддержку их работы в сетях «Интернета вещей»;
- новых типов дисплеев, в том числе OLED и AMOLED.

В дальнейшем, начиная с 2022÷2025 года, ожидается переход ко 2-й фазе внедрения технологии UHDTV – 8K, предполагающей использование нового поколения кодеков H.266. При этом рост эффективности использования информационной емкости телевизионного канала планируется обеспечить за счет внедрения новой технологии радиоканальной модуляции MIMO.

Параллельно с этим в ряде стран (Японии, Южной Корее, США, Китае и т.д.) проводятся работы по созданию технологий виртуальной реальности (VR) и голографического телевидения (цифровое телевидение 4-го поколения), экспериментальное вещание которых запланировано на 2025 год.

Россия в условиях глобализации рынков и интеграции в мировое информационное пространство не может оставаться в стороне от этих тенденций. Поэтому Министерством связи и массовых коммуникаций России в ноябре 2015 года была представлена «Стратегия развития телерадиовещания в Российской Федерации до 2025 года» (далее – Стратегия), которая содержит прогноз развития рынков, технологий и оборудования цифрового телевидения. Согласно Стратегии, генеральным направлением телевещания в нашей стране на ближайшие годы станет сочетание онлайн-вещания с интерактивным просмотром видеоконтента зрителями через различные типы стационарных и мобильных терминалов, в том числе с помощью смартфонов, планшетов и других типов коммуникаторов. В результате пассивный прием телепрограмм будет все больше замещаться активным телесмотрением на базе новейших телекоммуникационных и телевизионных технологий.

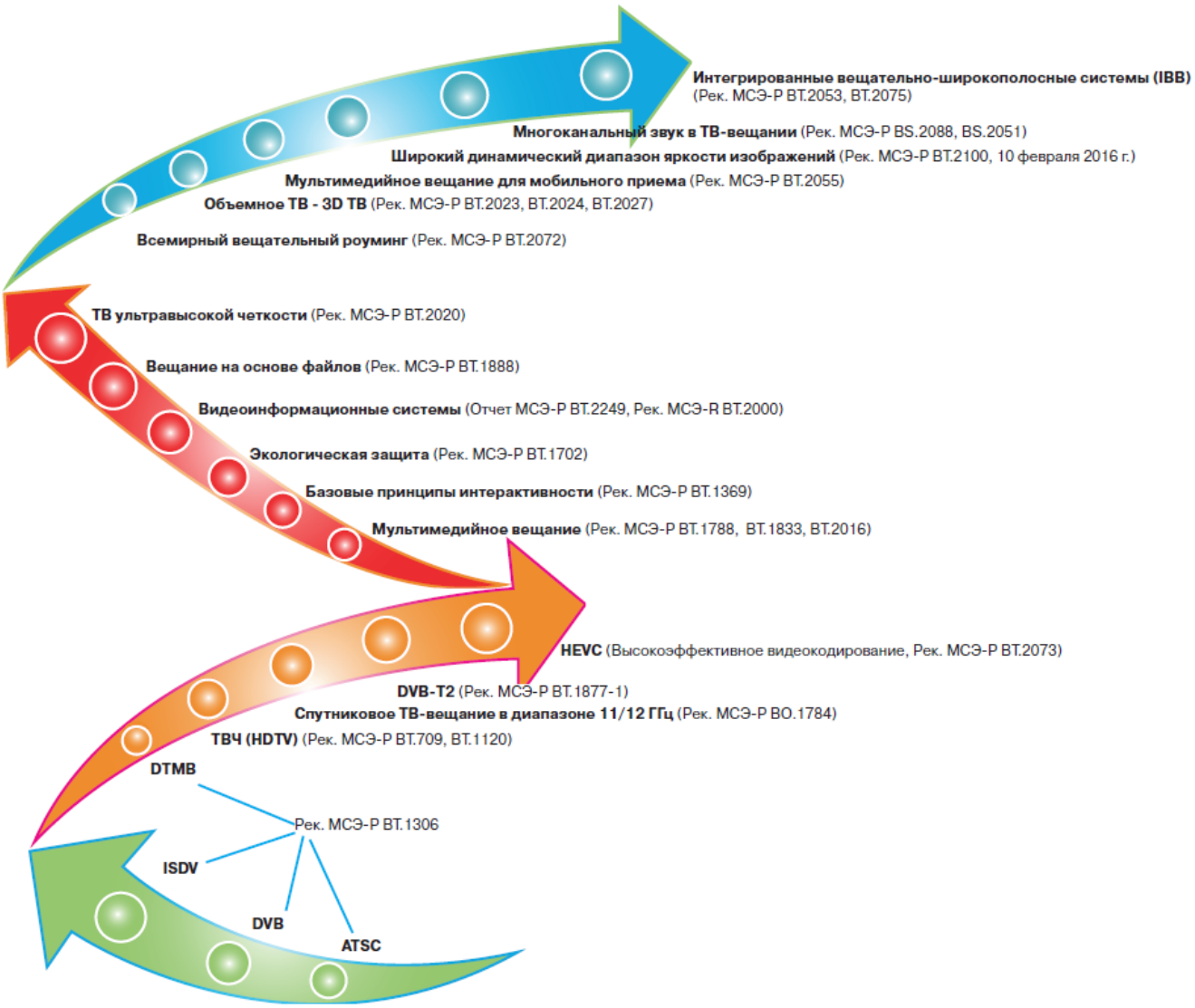


Рис.1. «Дорожная карта» развития технологий цифрового телевидения, предложенная почетным Председателем рабочей группы РГ-6 МККР проф. Кривошеевым М.И. (Россия) в 2016 году.

Российские производители профессионального и абонентского оборудования для сохранения конкурентоспособности на отечественном и мировых рынках должны оперативно реагировать на новые технологические вызовы и быть готовы к началу выпуска оборудования нового поколения. При этом технологии развиваются настолько быстро, что существует реальные риски инвестировать средства в технологии вчерашнего дня, имеющие короткие жизненные циклы.

Рис. 2. Вещательные платформы мультиэкранного кроссплатформенного цифрового телевидения (по данным компании «Vintera TV»).

Эта задача во многом осложняется объективными условиями, сложившимися на российском рынке, среди которых:

- кризисные явления в отечественной экономике, обеспечившие значительное сокращение рынков ряда типов оборудования (например, продажи телевизоров в 2016 году по сравнению с 2014 годом упали более чем в 2,5 раза);
- отсутствие доступных кредитов и высокие процентные ставки по ним, не обеспечивающие окупаемость многих инвестиционных проектов;
- сворачивание программ научно-технического сотрудничества с зарубежными партнерами и иностранных инвестиций в российские проекты в условиях экономических санкций со стороны ряда государств Запада;
- острый дефицит инвестиций, требуемых для успешной реализации программ импортозамещения радиоэлектронной аппаратуры, оборудования и их элементной базы.

В текущем году Президент и Правительство Российской Федерации объявили планы конверсии обороной промышленности и поэтапного увеличения после 2018 года доли гражданской продукции, выпускаемой предприятиями оборонно-промышленного комплекса (ОПК) страны. С учетом указанных выше неблагоприятных факторов проведение конверсии и выход предприятий ОПК на гражданские рынки является достаточно сложной задачей, решение которой потребует не только привлечения значительных по объему дополнительных финансовых инвестиций, но и поиска путей сокращения сроков разработки и освоения в серийном производстве конкурентоспособной продукции.

В этих условиях в России сформировался социальный заказ на создание центров компетенций по различным направлениям техники, которые бы помогали Минпромторгу России разработать и эффективно реализовывать промышленную политику в интересах отечественных производителей с целью повышения их конкурентоспособности и создания опережающего научно-технического задела. Многочисленные консультативные и экспертные советы, созданные в Министерстве, решают эти задачи лишь отчасти, так как состоят, как правило, из представителей одной отрасли промышленности. В то же время развитие цифрового телевидения требует рассмотрения и учета целого комплекса сложнейших задач в области систем и архитектуры сетей связи, алгоритмов цифровой обработки сигналов, «облачных» технологий хранения и передачи больших объемов данных, создания и производства современной аппаратуры и ее элементной базы, создания нормативно-технической базы и стандартов, разработки и осуществления мер государственной поддержки российских производителей. При этом с учетом быстрого развития технологий указанные вопросы должны решаться в относительно короткие сроки, чтобы не тормозить проекты внедрения цифрового телевидения.

Совершенно очевидно, что комплексное рассмотрение и решение проблем цифрового телевидения возможно только в рамках межотраслевых объединений, в которых участвуют представители Минпромторга и Минкомсвязи России, ФГУП РТРС, телевизионных компаний (в первую очередь ВГТРК), операторов связи, разработчиков и производителей профессионального и абонентского оборудования.

Другими словами, возникла объективная необходимость создания межотраслевого органа, способного осуществлять координацию научной и практиче-

ской деятельности по всему спектру проблем развития цифрового телевидения в Российской Федерации.

Межотраслевой совет по цифровому телевидению НТС ЦТ ЗАО «МНИТИ»

Такой орган – Научно-технический совет по цифровому телевидению (НТС ЦТ) – был создан при ЗАО «МНИТИ» как межотраслевая площадка для координации усилий производителей профессионального и абонентского оборудования, вещательных компаний, научно-исследовательских организаций, ВУЗов и других заинтересованных организаций в деле развития цифрового телевидения в России с целью повышения эффективности планирования стратегий развития всех участников рынка и освоению новых технологий.

Задачами НТС ЦТ определены анализ и выработка путей решения широкого круга сложнейших научно-технических задач, требующих тесного взаимодействия и синхронизации технической политики всех участников технологической цепочки подготовки, трансляции, приема и отображения программ цифрового телевидения.

Значительные объемы рынков профессионального и абонентского оборудования цифрового телевидения, а также масштаб и важность стоящей перед предприятиями и организациями отрасли задачи импортозамещения требуют согласованности решений и действий как участников рынка, так и органов государственной власти, ответственных за развитие производства в России соответствующего оборудования, что предопределило участие в НТС ЦТ Минпромторга и Минкомсвязи России.

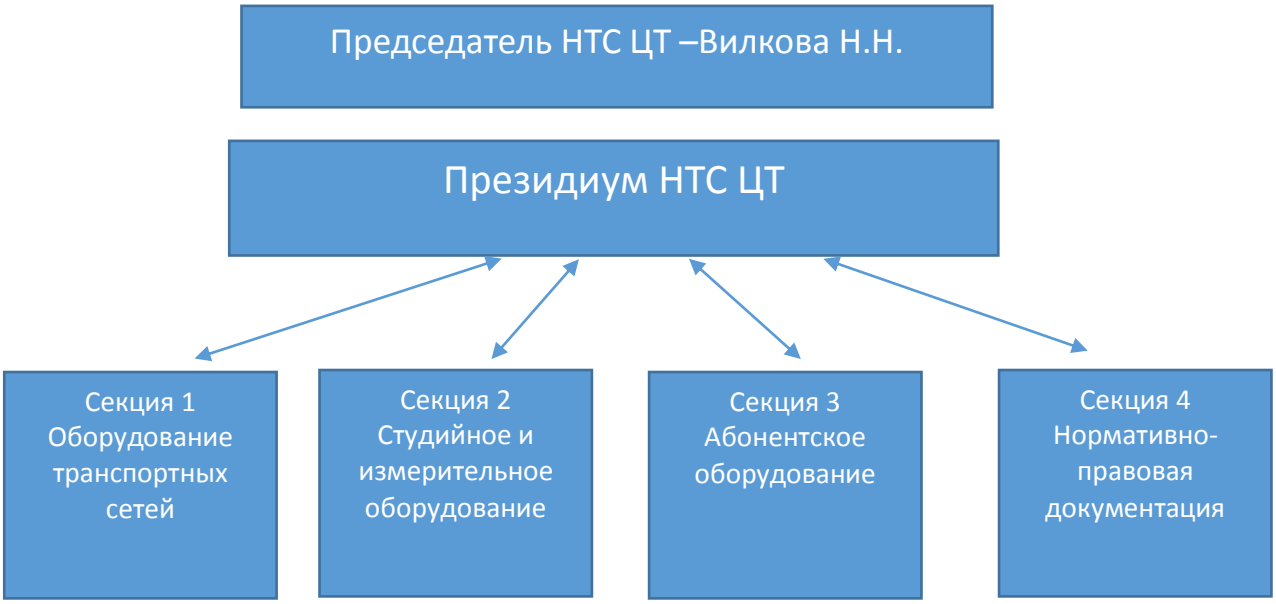
Всего в состав Совета вошли 49 представителей 36 компаний и организаций, в том числе ФГУП РТРС, ФГУП ВГТРК, ФГУП НИИР, компании GS и «Ти Пи Ви Си-Ай-Эс», ассоциаций НАТ, АКТР, АРПАТ и РАТЭК, АО «НИИТ», АО «ОмПО «Иртыш»» и др.

Структурно НТС ЦТ представлен Президиумом и четырьмя секциями:

- «Оборудование транспортных сетей»;
- «Студийное и измерительное оборудование»;
- «Абонентское оборудование»;
- «Нормативно-правовая документация».

Функции Председателя Совета решением его участников возложены на Генерального директора ЗАО «МНИТИ» Н.Н. Вилкову.

20 апреля 2016 года в ЗАО «МНИТИ» состоялось расширенное заседание Президиума научно-технического совета по цифровому телевидению, в работе которого приняли участие Директор Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга России С.В. Хохлов и Заместитель Генерального директора ФГУП РТРС В.Н. Пинчук.



	Организаций	Членов
Президиум	**11**	**16**
Секция 1	**9**	**11**
Секция 2	**12**	**13**
Секция 3	**14**	**16**
Секция 4	**8**	**10**
Итого:	**38***	**51***

* – итоговые суммы разнятся, так как некоторые члены секций входят в Президиум.

Рис. 3. Структура и состав НТС ЦТ при ЗАО «МНИТИ».

Участники заседания в своих выступлениях отметили актуальность и своевременность создания НТС ЦТ и выразили желание принять активное участие в его работе.

По итогам расширенного заседания ближайшими задачами Совета были определены разработка аналитического отчета «Развитие современных и перспективных технологий приема телевизионных сигналов с предложениями по их реализации российским производителям» со сроком его представления в Минпромторг России и другие заинтересованные организации – до конца 2016 года, а также разработка проекта новой редакции ГОСТ Р 55947-2014 «Приемники для цифрового эфирного вещания DVB-T2».

Координацию усилий всех заинтересованных сторон в выполнении указанных и иных задач в рамках НТС ЦТ, а также проведение научных исследований в области цифрового телерадиовещания призван обеспечить вновь созданный в структуре ЗАО «МНИТИ» Центр телевизионных технологий (ЦТТ-1090).

Научно-техническое сотрудничество с зарубежными странами

Сложность современных технологий цифрового телевидения требует привлечения для их разработки и внедрения значительных финансовых инвестиций и предопределяет необходимость тесного участия субъектов данного вида деятельности в международной научно-технической кооперации. На этом фоне трендом последних лет стало объединение компаний различной национальной принадлежности, в том числе признанных мировых лидеров, в международные альянсы, совместно решающие задачи разработки стандартов на перспективные технологии цифрового телевизионного вещания.

Не остался в стороне от этих процессов и наш институт. В частности, в рамках развития международного сотрудничества и с целью интеграции в международное научно-техническое сообщество по созданию телевизионных технологий следующего поколения в 2013 году ЗАО «МНИТИ» вошло в состав международной ассоциации FOBTV (The Future of Broadcast Television Initiative (FOBTV)), насчитывающей свыше 60 ведущих компаний со всего мира.

Рис. 4. Участники международного альянса FOBTV.

Целью международной ассоциации FOBTV заявлена разработка технологий и стандартов цифрового телевидения следующего поколения. Данная организация была образована в 2011 году по инициативе и при активном участии Национального научно-инженерного центра по цифровому телевидению Китая – NERC DTV (National Engineering Research Center of Digital TV in China) при Министерстве промышленности и информационных технологий Китая – национального органа, координирующего научные исследования и разработки в области цифрового телевидения в этой стране.

В свою очередь, партнерами NERC DTV являются все ведущие производители телевизионного оборудования Китая и научно-исследовательские организации страны, среди которых: Шанхайская индустриальная корпорация HD-технологий (“Shanghai High Definition Technology Industrial Corporation”), Шанхайский университет JiaoTong, Университет Tsinghua, Китайский институт стандартизации электроники (“China Electronics Standartization Institute” (CESI)), компании Changhong, Haier, Hisence, TCL Corporation, Konka Group,

Skyworth, BBEF, Shanghai Media Group, Shanghai Entertainment & Technology Group, Shenzhen GuoWei, HDIC, RRFF, BesTV и др.

Роль и значение NERC DTV как одного из основных мировых центров развития цифрового телевидения подтверждает тот факт, что в 2012 году по заданию Министерства промышленности и информационных технологий Китая именно силами его экспертной группы был разработан важный документ стратегического планирования – “Проект 863: Развитие ключевых технологий следующего поколения DTV” (National Hi Tech 863 Project “Developing the Key Technology of Next Generation DTV”), который лег в основу «Дорожной карты» создания стандарта следующего поколения цифрового телевидения КНР Next TDMB.

Сотрудничество ЗАО «МНИТИ» и NERC DTV началось в рамках FOBTV в 2013 году, а уже в ноябре 2014 года по результатам состоявшихся в Москве переговоров стороны вышли на этап подписания Соглашения о сотрудничестве, предусматривающего следующие направления совместной деятельности.

1. Проведение исследований в области создания эффективных кодеков HEVC.
2. Поиск партнеров для совместного производства цифровых телевизоров и их комплектующих в России.
3. Коммерциализация инновационных разработок российских и китайских компаний в Китае и России соответственно.
4. Проведение научных исследований и разработок стандарта цифрового телевидения следующего поколения.
5. Проверка эффективности предложенных решений в опытных зонах цифрового вещания в обеих странах.

Целью сотрудничества определены совместные разработки и взаимовыгодная коммерциализация их результатов в России и Китае. При этом со стороны КНР участниками совместной деятельности рассматриваются NERC DTV и его партнеры – потенциальные инвесторы перспективных проектов. С российской стороны потенциальными участниками определены ЗАО «МНИТИ» и его партнеры, в том числе: ЗАО «Элекард девайсез» (г. Томск), ОАО «Триада ТВ» (г. Новосибирск), Группа компаний «ЭЛВИС» (г. Зеленоград), ООО «Триаксесс Вижн» и БФУ (Балтийский Федеральный Университет) им. Канта (г. Калиниград).

Основными формами сотрудничества согласно договоренности должны стать: реализация совместных проектов, организация опытных зон вещания по новым технологиям, а также создание совместных предприятий российскими и китайскими компаниями.

Участие ЗАО «МНИТИ» в международном консорциуме FOBTV и подписание соглашения о стратегическом партнерстве между Институтом и центром NERC DTV обеспечили мощный импульс к дальнейшему сотрудничеству сторон, в рамках которого:

- 19-21 ноября 2014 года на Международном конгрессе «The 18 International Congress NAT-2014» в Москве сделан совместный доклад «Next Generation Terrestrial Broadcast Television System Collaboration» с предложениями по направлениям сотрудничества между российскими и китайскими компаниями в области цифрового телевидения;
- в 2015 году сделан совместный доклад на заседании XIV Российско-Китайской рабочей группы по сотрудничеству в области информационных технологий и сетевой безопасности в Москве;
- в 2016 году для российско-китайского инвестиционного форума Russia and China Annual Meeting in Hangzhou (24-25 July 2016, Hangzhou, China) ЗАО «МНИТИ», NERC DTV и их партнерами подготовлен совместный доклад-презентация проектов российских и китайских компаний «Russian and China Cooperation in Development and Commercialization Next Generation Key Technologies of Digital Television and Multimedia». Презентация подготовлена с целью поиска инвесторов этих проектов для их взаимовыгодной коммерциализации в России и Китае.

В рамках презентации были подготовлены 3 группы проектов в области технологий цифрового телевидения 2 и 3 поколений:

- разработки, готовые для немедленной реализации;
- совместные разработки имеющихся технологий и оборудования;
- перспективный проект работ в области голографического телевидения с целью создания опережающего научно-технического задела в области цифрового телевидения 4 поколения.

В проекте отмечается, что в России и Китае разработаны перспективные технологии мирового уровня, которые могут быть успешно реализованы на мировом рынке. Однако для их реализации требуются инвестиции и меры государ-

ственной поддержки в России и Китае. В частности, проект голографического телевидения, которое будет определять развитие телевизионных технологий после 2025 года не может быть коммерциализован в ближайшее время. В то же время создание опережающего научного задела в этой области техники станет решающим фактором конкурентоспособности на мировом рынке на долгие годы.

Рис. 5. Совместный доклад ЗАО «МНИТИ и NERC DTV на российско-китайском инвестиционном форуме Russia and China Annual Meeting in Hangzhou (24-25 July 2016, Hangzhou, China).

Этот проект был представлен 29 октября - 2 ноября 2016 года на заседании Российско-китайской рабочей группы по сотрудничеству, возглавляемой Заместителем Министра промышленности и торговли Российской Федерации А.И. Богинским, и был рекомендован к включению в Протокол заседания Российско-китайской комиссии по сотрудничеству в 2016 году.

Таким образом, ЗАО «МНИТИ» продолжает кропотливую и каждодневную работу, направленную на создание перспективных технологий цифрового телевидения следующих поколений, активно используя в своей деятельности возможности как российских, так и международных коллегиальных площадок, обеспечивающих координацию усилий всех заинтересованных сторон. При этом основными формами межотраслевого и международного взаимодействия с участием Института на ближайшую и среднесрочную перспективу сохранятся Научно-технический совет по цифровому телевидению при ЗАО «МНИТИ» – с одной стороны, а также международная ассоциация FOBTV и двустороннее сотрудничество с Национальным научно-инженерным центром по цифровому телевидению Китая (NERC DTV) – с другой.

УДК 621.397

Кукк К.И., д.т.н., проф.

СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

В статье приводится описание современных систем для хранения мультимедийной информации в сфере телевидения с целью демонстрации их многообразия и даются рекомендации по их унификации.

Одной из важнейших задач инфраструктуры телекомпании является хранение мультимедийной информации, то есть видео и аудио профессионального качества. В настоящее время вся мультимедийная информация переведена на цифровой формат, и соответственно ее хранение также осуществляется в цифровом виде, что позволило сократить объемы архивов по сравнению с архивами аналоговой информации.

В студийных архивах хранятся видеофайлы в различных форматах четкости с необходимыми метаданными, аудиоматериалы, «сырые» материалы со съемок, фотографии, эфирные заставки, плашки для оформления эфира, баннеры и т.д.

От построения системы хранения данных зависит степень автоматизации технологических процессов телеканала, а, следовательно, сроки, качество и стоимость работ по монтажу и обработке мультимедийной информации.

Непрерывно происходит «утяжеление» видеоинформации. От телевидения стандартного качества (СД) осуществлен переход к телевидению высокой четкости (ТВЧ), далее следует телевидение сверхвысокой четкости (4К) и (8К). Это требуют непрерывного увеличения емкости систем хранения.

По разным оценкам ежегодный прирост новой информации, подлежащей хранению для крупных телекомпаний, составляет 1-2,5 Пбайт (10^{15}) в год. В дальнейшем это приращение будет только увеличиваться. Таким образом, система должна допускать расширение без нарушения ее функционирования. Но необходимо не только хранить, надо еще и управлять архивом и обеспечивать оперативный доступ и скачивание информации, поэтому такие архивы можно также классифицировать как центры обработки данных (ЦОД). Помимо собственных ЦОДов, принадлежащих телекомпаниям, не исключено использование облачных технологий.

Хранимые данные обычно классифицируются на четыре-пять категорий по степени востребованности. Многоуровневое хранение данных использует различные устройства для хранения информации. Наиболее востребованные данные могут храниться на флеш-накопителях, менее оперативные данные на дисках, а редко используемые данные в ленточных библиотеках.

Основные требования к архивам: высокая отказоустойчивость, масштабируемость, большой срок службы, гарантированная сохранность данных, производительность, доступность к материалам, цена.

Принимаются все необходимые и возможные меры по обеспечению безопасности данных, которые периодически атакуются хакерами. Архивы должны быть защищены от возможности случайного изменения или удаления данных при однократном или многократном чтении информации. Для этого создаются RAID-массивы, в которых используется дублирование данных на нескольких носителях информации. В зависимости от уровня RAID система может выигрывать в большей или меньшей степени в экономичности, надежности или скорости.

Хранимая информация должна быть доступна не только сотрудникам телекомпании (внутренняя система хранения данных), но и ее клиентам (внешняя система хранения данных). Число одновременных обращений в архив может достигать нескольких десятков.

Сложный характер построения хранилищ привел к необходимости разработки специальных систем управления медиактивами (MAM – Media Asset Management). Для многоуровневых хранилищ разработано программное обеспечение для иерархического управления (HSM – Hierarchical Storage Management). Оно позволяет автоматически перемещать файлы по уровням в зависимости от востребованности.

Современными средствами хранения цифровой информации являются ленточные носители, дисковые системы и твердотельная память.

Широкое применение нашли ленточные носители по технологии LTO (Linear Tape-Open). Ленточные носители характеризуются низкой стоимостью при высокой емкости. Емкость картриджа LTO-6 составляет до 6,25 терабайта (с компрессией) при скорости передачи до 400 мегабайт в секунду. Ленточные носители используются для резервного копирования, а также, когда доступ к ним не является сверхоперативным. Для оперативного доступа используются

дисковые накопители и твердотельная память (SSD – Solid-State Drive). Дисковые массивы имеют более высокую стоимость и требуют больших эксплуатационных расходов. Твердотельная память обеспечивает высокую скорость доступа, но имеют ограниченные возможности по количеству циклов чтения/записи.

Поставщиками оборудования архивов, включая системы управления, в настоящее время являются зарубежные компании EMC, HP, IBM, Oracle, DELL, NetApp (все США), Tandberg Data (Норвегия), Fujitsu, Hitachi Data Systems (Япония), Lenovo, Huawei (Китай), Synology (Тайвань) и др.

В 2015 г. Россия приобрела за рубежом внешних систем хранения данных различного назначения емкостью 480 539 терабайт на общую сумму 380,9 млн. долл.

К российским предприятиям, разрабатывающим в ограниченном объеме и выпускающим СХД или отдельные составные части относятся ООО «Промобит», ООО «Raidix», ЗАО «R-Style», ООО «Булат», ЗАО «Ай-Теко», ЗАО «Крок», ЗАО «Свет Компьютерс», ЗАО «Крафтвей», ООО «Арсиэнтек». Программное обеспечение для СХД разрабатывают ГК «Digital Design», ООО «Raidix», ЗАО «Сапран», компания «AvroRAID».

Следует отметить, что многие коммерческие предприятия, а также предприятия с преобладающей долей государственных акций, в последнее время, в рамках импортозамещения, стали в большем объеме осваивать производство высокотехнологичных телекоммуникационных изделий, в том числе для СХД. Различные носители информации, коммутационные устройства, серверы и др. оборудование находит широкое применение в различных сферах народного хозяйства

В связи с подписанием Президентом РФ 6 июля 2016 г. пакета законопроектов, ужесточающих ответственность за преступления террористического и экстремистского характера, Минпромторгу России поручается организовать производство отечественного оборудования для хранения и обработки информации.

Это оборудование почти полностью совпадает со средствами хранения, которое используется телеканалами. Основная разница будет заключаться в системах управления этими средствами.

Определенным опытом по импортозамещению оборудования для систем хранения данных (дисковые системы, флэш-системы, ленточные накопители) обладает компьютерная компания «Аквариус». Она входит в холдинг «Национальная компьютерная корпорация» и имеет собственный завод по выпуску компьютерной техник в г. Шуя мощностью 360-400 тыс. компьютеров в год. Поставки твердотельных накопителей компания «Аквариус» заказала в холдинге GS Group. В свою очередь холдинг GS Group намерен производить, начиная со второй половины 2017 г., более 1 миллиона SSD-накопителей в год на мощностях своего кластера «Технополис GS» в Калининградской области. Прототип SSD-накопителя емкостью 256 Гб будет представлен в начале следующего года. Электронные компоненты для прототипа SSD-накопителя GS Group будет закупать у Samsung (Корейская Республика), Nanya (Тайвань) и Micron (США).

Производством горизонтально-масштабируемых систем хранения данных на дисковых и твердотельных модулях занимается ООО «Арсиэнтек» (Москва).

Разработку программного обеспечения поручается имеющей большой опыт петербургской компании «Рейдекс» (Raidex), в которую ПАО «Ростелеком» инвестировало 100 млн. руб.

«Объединенная приборостроительная корпорация» заявила о готовности к выходу на российский рынок линейки отечественных систем хранения данных (СХД) «Эльбрус», в которых будут использоваться российские компоненты и программное обеспечение. Опытные образцы уже предоставляются для тестирования заказчикам. Производит СХД омская компания «Промобит». СХД «Эльбрус» базируются на процессоре «Эльбрус-4С». Первые партии – примерно сотни штук. Благодаря горизонтально масштабируемой архитектуре по требованию заказчика несколько СХД могут образовывать единую систему хранения данных емкостью в несколько петабайт.

О разработке системы хранения данных сверхбольших объемов объявил Национальный Центр Информатизации (НЦИ, входит в государственную корпорацию «Ростех»). Согласно официальной информации НЦИ, система хранения может обеспечить емкость от нескольких петабайт до десятков экзабайт. Новая платформа позволяет создавать как объектовые, так и распределенные системы хранения данных. Технологическая платформа допускает использование всех типов накопителей. Она базируется на операционной системе «Авро-

ра», разработанной специалистами НЦИ, которая представляет класс защищенных ОС на базе ядра GNU/Linux.

Учитывая развертывание в Российской Федерации работ по созданию отечественных СХД во исполнение закона № 374-ФЗ от 6 июля 2016 г. представляется целесообразным осуществить взаимную унификацию их со средствами хранения, необходимыми для телевещательных компаний.

УДК 631.397

Бухалёв В.А., д.т.н., проф.
Болдинов В.А., к.т.н., доц.
Сухачев А.Б., д.т.н.
Шапиро Б.Л.
Перчаткин Н.А.

ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ КООРДИНАТОРА ОБЪЕКТА

Рассматривается задача взаимосвязанного одновременного распознавания состояния структуры и оценивания фазовых координат объекта в процессе наведения беспилотного летательного аппарата, оснащенного измерительно-информационной системой. Полученный в результате синтеза рекуррентный байесовский алгоритм, основанный на теории систем со случайной скачкообразной структурой, обладает повышенной устойчивостью к информационному противодействию.

Введение

В системах наведения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) применяются различные типы пеленгаторов объектов в зависимости от назначения и типа БЛА, номенклатуры объектов, средств и способов противодействия, условий применения, характеристик внешней среды, которые могут изменяться в широких пределах [1, 2].

Наведение БЛА на объект осуществляется по сигналам гиростабилизированного следящего координатора (ГСК), в состав которого входит пеленгатор, обеспечивающий информационную связь с объектом наведения. Алгоритм формирования сигнала, управляющего ГСК, зависит от случайных оценок пе-

ленгатора, которые могут изменяться непредсказуемым образом в весьма широких пределах в процессе наведения. Это является одной из особенностей, затрудняющих оптимизацию подобных алгоритмов. Алгоритмы, основанные на традиционных методах обработки информации, рассмотрены в [3-5]. Использование корреляционно-экстремальных методов обработки информации применительно к монохромным оптико-электронным и радиолокационным системам рассмотрены в [6], а применительно к спектрозональным оптико-электронным системам – в [7]. Алгоритмы, основанные на теории систем со случайной скачкообразной структурой (ССС) [1, 2, 8-17], осуществляют взаимосвязанное комплексирование оценок индикаторов структуры и измерителей фазовых координат в едином алгоритме. Этот подход, рассматриваемый в настоящей статье, как показано в [1, 2, 14-17], повышает помехоустойчивость системы наведения, хотя и несколько усложняет реализацию алгоритмов в бортовой ЭВМ БЛА.

Постановка задачи

Предполагая, что пространственную траекторию движения БЛА относительно малоподвижного объекта можно разделить на две независимых друг от друга траектории – в вертикальной и горизонтальной плоскостях, законы управления для которых идентичны. Процесс слежения за объектом для каждой из плоскостей характеризуется двумя фазовыми координатами: углом визирования объекта ε_k и угловой скоростью $\omega_k \triangleq \dot{\varepsilon}_k$, где k – дискретный момент времени, а символ $\triangleq$ означает «равенство по определению».

Угловое рассогласование $\triangle\varepsilon_k$ между углом визирования и направлением оси чувствительности координатора ε_k^+ измеряется с ошибкой ζ_k: $\triangle\varepsilon_k^M = \triangle\varepsilon_k + \zeta_k = \varepsilon_k - \varepsilon_k^+ + \zeta_k$. Рассматривается три возможных помеховых ситуации (три состояния структуры), образующих полную группу несовместных случайных событий: $s_k = 1$ – «информационный контакт с объектом отсутствует»; $s_k = 2{,}3$ – «информационный контакт с объектом есть», причем при $s_k = 2$ дисперсия $Q_k(s_k = 2)$ ошибки ζ_k минимальна: $Q_k(2) = Q_k^{min}$, а при $s_k = 3$ дисперсия $Q_k(s_k = 3)$ максимальна: $Q_k(3) = Q_k^{max}$.

Математическую формулировку постановки задачи можно представить в следующем виде. Математическая модель траектории БЛА относительно объ-

екта и математическая модель измерений и помех описываются в дискретной форме уравнениями [7, 8]:

$$\varepsilon_{k+1} = \varepsilon_k + \triangle t \omega_k, \quad \omega_{k+1} = \omega_k + \frac{\triangle t}{\tau_k}\left(2\omega_k + u_k + \xi_k\right), \tag{1.1}$$

$$\triangle \varepsilon_k^M = C_k\left(s_k\right)\left(\varepsilon_k - \varepsilon_k^+\right) + \zeta_k\left(s_k\right); \tag{1.2}$$

$$C_k\left(s_k\right) = \begin{cases} 0, s_k = 1, \\ 1, \ s_k = 2, \\ 1, \ s_k = 3; \end{cases}$$

$$P\left[s_{k+1} | s_k\right] = q_k\left(s_{k+1} | s_k\right), \tag{1.3}$$

$$P\left[r_{k+1} | r_k, s_{k+1}\right] = \pi_{k+1}\left(r_{k+1} | r_k, s_{k+1}\right), \tag{1.4}$$

$$s_k, r_k = 1,2,3,$$

где k – дискретный момент времени; ε_k – угол визирования цели; ω_k – угловая скорость линии визирования; u_k – сигнал управления; ξ_k – внешнее возмущение; $\tau_k = \left(t_n - t_k\right)$ – время, оставшееся до конца наведения; ε_k^+ – угол оси чувствительности гиростабилизированного следящего координатора (ГСК); ε_k^M – измерение угла рассогласования между углами ε_k и ε_k^+; $\zeta_k\left(s_k\right)$ – помеха в канале измерения; s_k – индекс структуры; r_k – индекс индикатора структуры; $P[\bullet]$ – символ вероятности.

<u>Известны:</u> дисперсии центрированных гауссовых белых шумов ξ_k и $\zeta_k\left(s_k\right)$: G_k, $Q_k(1)$, $Q_k(2)$, $Q_k(3)$, соответственно, вероятности переходов $q_k\left(s_{k+1} | s_k\right)$ марковской цепи s_k; вероятности переходов $\pi_{k+1}\left(r_{k+1} | r_k, s_{k+1}\right)$ условной марковской цепи r_k при фиксированных s_k; функции времени τ_k, u_k; начальные значения вероятностей состояний структуры $p_0\left(s_0\right)$; начальные значения условных математических ожиданий $\bar{\varepsilon}_0\left(s_0\right)$, $\bar{\omega}_0\left(s_0\right)$ и дисперсий $R_{\varepsilon_0}\left(s_0\right)$, $R_{\omega_0}\left(s_0\right)$ при фиксированных ситуациях s_0.

<u>Требуется найти</u>: оптимальный алгоритм распознавания помеховых ситуаций и оценивания координат объекта в момент k, в классе детерминированных зависимостей от наблюдений $\triangle \varepsilon_{\overline{0,k}}^M \triangleq \left(\triangle \varepsilon_0^M, \triangle \varepsilon_1^M, ..., \triangle \varepsilon_k^M\right)$ и $r_{\overline{0,k}} \triangleq \left(r_0, r_1, ..., r_k\right)$.

Решение

Синтез алгоритма основан на методах теории систем ССС, изложенных в [6-11], и сводится к следующему. Функционально алгоритм состоит из четырех блоков: «классификатор структуры», «идентификатор структуры», «фильтр» и «дисперсиометр».

Классификатор определяет вероятности ситуаций – $\hat{p}_k(s_k)$, идентификатор – оценку ситуации – $\hat{s}_k$, фильтр – оценки угла и угловой скорости – $\hat{\varepsilon}_k$ и $\hat{\omega}_k$, дисперсиометр – дисперсии ошибок оценивания – $\hat{R}_{\varepsilon_k}$ и $\hat{R}_{\omega_k}$.

Хронологически алгоритм работает по двухэтапной схеме «прогноз-коррекция». На первом этапе вычисляются оценки, прогнозируемые на один шаг дискретности вперед: $\tilde{p}_k(s_k)$, $\tilde{\varepsilon}_k$, $\tilde{\omega}_k$, $\tilde{R}_{\varepsilon_k}$, $\tilde{R}_{\omega_k}$. На втором этапе вычисляются апостериорные оценки $\hat{p}_k(s_k)$, $\hat{\varepsilon}_k$, $\hat{\omega}_k$, $\hat{R}_{\varepsilon_k}$, $\hat{R}_{\omega_k}$ как результат комплексирования прогнозируемых оценок и наблюдений в момент k: ε_k^M, r_k.

На основании теоретических результатов для линейной системы ССС с марковской структурой [6-8] и в соответствии с условиями задачи (1.1-1.4) получаем уравнения приближенно-оптимального алгоритма:

– классификатор структуры:

$$\tilde{p}_{k+1}(s_{k+1}) = \sum_{s_k} q_k(s_{k+1}|s_k)\hat{p}_k(s_k), \tag{2.1}$$

$$\hat{p}_{k+1}(s_{k+1}) = \frac{\tilde{p}_{k+1}(s_{k+1})\pi(r_{k+1}|r_k, s_{k+1})\exp(-h_{k+1}(s_{k+1}))}{\sum_{s_{k+1}} \tilde{p}_{k+1}(s_{k+1})\pi(r_{k+1}|r_k, s_{k+1})\exp(-h_{k+1}(s_{k+1}))}, \tag{2.2}$$

$$\hat{p}_0(s_0) = p_0(s_0), \quad k = 0,1,2,.....; \quad \text{где} \quad \sum_{s_k} \triangleq \sum_{s_k=1}^{3},$$

$$h_{k+1}(1) \triangleq \frac{1}{2}\frac{\left(\triangle\varepsilon_{k+1}^M\right)^2}{Q_{k+1}(1)}, \tag{2.3}$$

$$h_{k+1}(s) \triangleq \frac{1}{2}\frac{\left[\triangle\varepsilon_{k+1}^M + \tilde{\varepsilon}_{k+1} - \tilde{\varepsilon}_{k+1}(s)\right]^2}{Q_{k+1}(1)\left(1 + K_\varepsilon(s)\triangle t/\tau_{k+1}\right)}, \qquad s = 2,3; \tag{2.4}$$

– идентификатор структуры:

$$\hat{s}_k = \arg\max_{s_k} \hat{p}_k(s_k) \tag{2.5}$$

– фильтр:

$$\tilde{\varepsilon}_{k+1}\left(s_{k+1}\right)=\tilde{p}_{k+1}^{-1}\left(s_{k+1}\right)\left\{\sum_{s_k=1}^{3} q_k\left(s_{k+1}\middle|s_k\right)\hat{p}_k\left(s_k\right)\times\left[\hat{\varepsilon}_k\left(s_k\right)+\hat{\omega}_k\left(s_k\right)\Delta t\right]\right\},$$

$$\tilde{\omega}_{k+1}\left(s_{k+1}\right)=\tilde{p}_{k+1}^{-1}\left(s_{k+1}\right)\left\{\sum_{s_k=1}^{3} q_k\left(s_{k+1}\middle|s_k\right)\hat{p}_k\left(s_k\right)\times\left[\hat{\omega}_k\left(s_k\right)+\Delta t\tau_k^{-1}\left(2\hat{\omega}_k\left(s_k\right)+u_k\right)\right]\right\},\ s_k=1,2,3$$

(2.6)

$$\hat{\varepsilon}_{k+1}(1)=\tilde{\varepsilon}_{k+1}(1),\quad \hat{\omega}_{k+1}(1)=\tilde{\omega}_{k+1}(1),$$

$$\hat{\varepsilon}_{k+1}\left(s_{k+1}\right)=\tilde{\varepsilon}_{k+1}\left(s_{k+1}\right)+\left(K_\varepsilon\left(s_{k+1}\right)\Delta t\tau_{k+1}^{-1}\right)\Delta\varepsilon_{k+1}^{M},$$

$$\hat{\omega}_{k+1}\left(s_{k+1}\right)=\tilde{\omega}_{k+1}\left(s_{k+1}\right)+\left(K_\omega\left(s_{k+1}\right)\Delta t\tau_{k+1}^{-1}\right)\Delta\varepsilon_{k+1}^{M},\quad s_k=2,3 \tag{2.7}$$

$$\hat{\varepsilon}_{k+1}=\sum_{s_{k+1}=1}^{3}\hat{\varepsilon}_{k+1}\left(s_{k+1}\right)\hat{p}_{k+1}\left(s_{k+1}\right),\ \hat{\omega}_{k+1}=\sum_{s_{k+1}=1}^{3}\hat{\omega}_{k+1}\left(s_{k+1}\right)\hat{p}_{k+1}\left(s_{k+1}\right); \tag{2.8}$$

– <u>дисперсиометр</u>:

$$K_\varepsilon\left(s_k\right)=\left[\frac{1}{2}\left(1+\sqrt{1+16\frac{G_k}{Q_k\left(s_k\right)}}\right)\right]^{1/2},$$

$$K_\omega\left(s_k\right)=\frac{1}{2}K_\varepsilon\left(s_k\right)\left[K_\varepsilon\left(s_k\right)+1\right],\qquad s_k=2,3 \tag{2.9}$$

– <u>слежение ГСК за объектом</u>:

$$\varepsilon_{k+1}^{+}=\tilde{\varepsilon}_{k+1},\quad \tilde{\varepsilon}_{k+1}=\sum_{s_{k+1}}\tilde{\varepsilon}_{k+1}\left(s_{k+1}\right)\tilde{p}_{k+1}\left(s_{k+1}\right) \tag{2.10}$$

Анализ алгоритма

Полученный помехоустойчивый алгоритм обработки информации представляет собой замкнутую систему обыкновенных рекуррентных уравнений (2.1), (2.2), (2.5-2.10). Алгоритм осуществляет приближенно-оптимальное распознавание помеховых ситуаций s_k и оценивание фазовых координат объекта на основании неточных показаний индикатора r_k и измерителя ε_k^M.

По сравнению с классическим оптимальным алгоритмом фильтра Калмана представленный алгоритм имеет более простой вид. При этом дисперсии ошибок оценивания $\hat{R}_{\varepsilon_k}$, $\hat{R}_{\omega_k}$ могут быть вычислены заранее до начала работы фильтра, поскольку не зависят ни от измерений ε_k^M, ни от оценок координат $\hat{\varepsilon}_k$, $\hat{\omega}_k$.

Особенностью разработанного алгоритма является взаимосвязанное одновременное распознавание состояния структуры и оценивание фазовых координат объекта с комплексированием информации от индикатора и измерителя. Предложенный подход позволяет существенно упростить алгоритм обработки

информации при незначительной потере в точности решений, что хорошо иллюстрируют результаты моделирования (рисунок 1).

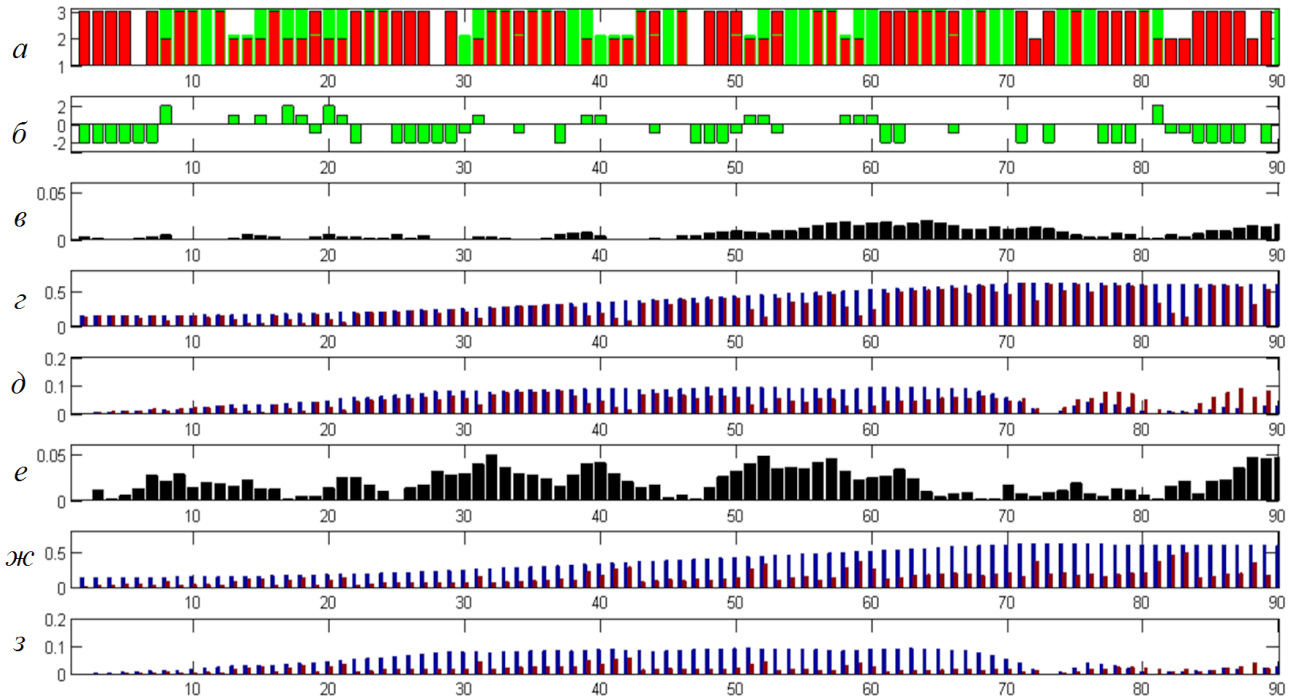


Рис. 1. Результаты моделирования работы алгоритма.

На графиках рисунка 1 отображены работа индикатора (*а*), идентификатора (*б*) и фильтра (*г*, *д*, *ж*, *з*), а также ошибки измерителя (*в*, *е*):

а – индекс структуры s_k и индикатор структуры r_k;

б – ошибки оценивания индекса структуры $s_k - \hat{s}_k$;

в – помехи в канале измерения ζ_k при Q_k^{min};

г – угол визирования объекта и его оценки ε_k, $\hat{\varepsilon}_k$ при Q_k^{min};

д – угловая скорость линии визирования и ее оценки ω_k, $\hat{\omega}_k$ при Q_k^{min};

е – помехи в канале измерения ζ_k при Q_k^{max};

ж – угол визирования объекта и его оценки ε_k, $\hat{\varepsilon}_k$ при Q_k^{max};

з – угловая скорость линии визирования и ее оценки ω_k, $\hat{\omega}_k$ при Q_k^{max}.

Уровень точности работы индикатора при определении текущего индекса структуры s_k (регистрации помеховых ситуаций) зависит от сложности организации принятия решений о наступлении помеховых ситуаций r_k, а также инерционности в принятии этих решений. В результате неточной работы индикато-

ра (*а*) оценка помеховых ситуаций $\hat{s}_k$ идентификатором выполняется также с ошибками (*б*). Кроме того, большое влияние на точность наведения БЛА оказывают точностные характеристики его измерителя $\zeta_k(s_k)$ (*в*, *е*). При низком уровне помех ($Q_k(2) = Q_k^{min}$) в канале измерителя (*в*) оценки фазовых координат $\hat{\varepsilon}_k$ (*г*) и $\hat{\omega}_k$ (*д*), получаемые фильтром (2.6-2.8), довольно близки к оцениваемым переменным ε_k (*г*) и ω_k (*д*). Высокий уровень помех ($Q_k(3) = Q_k^{max}$) в канале измерителя (*е*), соизмеримый с уровнем полезного сигнала, на фоне неточной работы индикатора (*а*) приводит к существенному искажению фильтром оцениваемых переменных $\hat{\varepsilon}_k$ (*ж*) и $\hat{\omega}_k$ (*з*). Однако, даже в этом случае, обеспечивается приемлемый уровень ошибок наведения.

Заключение

В отличие от задач, решаемых в [2, 15], где рассматривались помеховые ситуации, учитывающие особенности вторичной обработки информации в условиях искажения полезного сигнала, поступающего в измеритель, в настоящей работе учитываются случайные изменения точностных оценок пеленгатора в широких пределах, вплоть до кратковременных перерывов поступления информации в измеритель.

К достоинствам разработанного алгоритма можно отнести: во-первых, возможность выполнения одновременного и взаимосвязанного распознавания помеховых ситуаций и оценивания координат объекта, во-вторых, независимое от физических принципов работы датчиков информации комплексирование априорной и текущей информации, полученной от индикаторов помеховых ситуаций и измерителей параметров движения БЛА.

При этом, как показывают результаты математического моделирования, несмотря на ряд ошибочных показаний индикатора r_k и измерителя ε_k^M, оценки фазовых координат $\hat{\varepsilon}_k$, $\hat{\omega}_k$ и оценка индекса структуры $\hat{s}_k$, получаемые в результате работы разработанного алгоритма, довольно близки к оцениваемым переменным ε_k, ω_k, s_k.

Литература

1. Бухалёв В.А., Вилкова Н.Н, Шапиро Б.Л., Прядкин С.П., Болдинов В.А. Помехоустойчивые алгоритмы обработки информации в тепловизион-

ных и радиотехнических системах наведения беспилотных летательных аппаратов // Труды международной НТК "Научно-технические проблемы построения систем и комплексов землеобзора, дозора и управления и комплексов с беспилотными летательными аппаратами". Том 2, 2013. – М.: ОАО "Концерн "Вега". – С. 52-65.

2. Бухалёв В.А., Вилкова Н.Н., Шапиро Б.Л., Прядкин С.П., Болдинов В.А. Алгоритм помехозащиты системы наведения беспилотного летательного аппарата от скачкообразной помехи, основанный на вероятностной аппроксимации бета-распределением. // Информационно-измерительные и управляющие системы. № 11, 2014 г. – С. 37-49.
3. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Советское радио, 1968.
4. Миддлтон Д. Введение в статистическую теорию связи. Пер. с англ. / Под ред. Б.Р. Левина, т. II. – М.: Советское радио, 1962.
5. Патрик Э. Основы теории распознавания образов. Пер. с англ. / Под ред. Б.Р. Левина. – М.: Советское радио, 1980.
6. Баклицкий В.К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения. – Тверь: ТО «Книжный клуб», 2009. – 360 с.
7. Ковин С.Д. Определение облика измерителя параметров частотно-временных сигналов в спектрозональной аппаратуре, предназначенной для решения задач навигации и мониторинга земной поверхности. // Материалы XIII научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли», – Калуга: «Манускрипт», 2016. – С. 347-350.
8. Бухалёв В.А. Распознавание, оценивание и управление в системах со случайной скачкообразной структурой. – М.: Наука, 1996. – 287 с.
9. Бухалёв В.А. Основы автоматики и теории управления. – М.: ВВИА им. Н.Е Жуковского, 2006. – 406 с.
10. Бухалёв В.А. Обработка информации и управление ракетами в условиях противодействия. – М.: ВВИА им. Н.Е Жуковского, 2009. – 146 с.
11. Казаков И.Е., Артемьев В.И. Оптимизация динамических систем случайной структуры. – М.: Наука, 1980.
12. Казаков И.Е., Артемьев В.И., Бухалёв В.А. Анализ систем случайной структуры. – М.: Наука. 1993. – 272 с.

13. Бухалёв В.А. Оптимальное сглаживание в системах со случайной скачкообразной структурой. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 188 с.
14. Болдинов В.А., Бухалёв В.А., Скрынников А.А. Алгоритм распознавания состояния системы массового обслуживания, основанный на теории систем со случайной скачкообразной структурой. // Изв. РАН. Теория и системы управления. № 3, 2014. – С. 27-37.
15. Бухалёв В.А., Прядкин С.П., Болдинов В.А., Скрынников А.А. Комплексная обработка информации измерителя сигнала и индикатора помеховых ситуаций в линейной стохастической системе. // Вестник компьютерных и информационных технологий. № 12, 2014. – С. 10-17.
16. Болдинов В.А., Бухалёв В.А., Прядкин С.П., Скрынников А.А. Информационно-управляющий алгоритм системы массового обслуживания, основанный на теории систем со случайной скачкообразной структурой. // Изв. РАН. Теория и системы управления. № 2, 2015. – С. 56-67.
17. Болдинов В.А., Бухалёв В.А., Сухачев А.Б., Шапиро Б.Л. Помехоустойчивый алгоритм обработки информации тепловизионного координатора объекта. // Информационно-измерительные и управляющие системы. Том 14, № 5 – М.: «Радиотехника», 2016. – С. 36-42.

УДК 621.397.13

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

СПОСОБЫ ОБЪЕДИНЕНИЯ РАЗНОСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассматривается возможность формирования объединенного (результирующего) изображения на мониторе оператора с целью его упрощения и улучшения восприятия информации.

Введение

Телевизионные методы и системы находят все большее применение в современных областях науки и техники для решения различных информацион-

ных, измерительных или управленческих задач. Для повышения эффективности и круглосуточности видеонаблюдения объектов используют разноспектральные телевизионные (ТВ) и тепловизионные (ТПВ) системы, которые осуществляют регистрацию лучистого (светового) потока в различных спектральных участках (зонах) оптического спектра.

Наиболее важным вопросом при синтезе нескольких разноспектральных изображений является формирование объединенного (результирующего) изображения. Полезная информация, необходимая для принятия решения наблюдателем (оператором), может быть распределена между изображениями различных зон регистрации лучистого (светового) потока. В этом случае оператор вынужден анализировать несколько изображений и сопоставлять их между собой, что может приводить к задержкам в принятии решения. По этой причине целесообразно выводить на экран отображающего устройства объединенное изображение, синтезированное из нескольких исходных разноспектральных ТВ/ТПВ изображений в черно-белом варианте или в цветном виде. Помимо снижения объема данных, цель синтеза в создании новых изображений, которые более удобны с точки зрения восприятия/анализа человеком/автоматом, а также для дальнейших задач обработки, таких как сегментация и селекция объектов, их захват и т.д.

При объединении разноспектральных изображений эффективность общей разноспектральной ТВ/ТПВ системы по дальности обнаружения объектов может быть выше эффективности каждого из каналов [1-3]. Расширение общего спектрального участка регистрации лучистого потока и синтез изображений, полученных в различных участках (зонах) регистрации, существенно повышает информативность получаемых видеоданных.

Представим, например, что ультрафиолетовая (УФ) область спектра (0,25-0,37 мкм) имеет ширину равную величине $\Delta\lambda_{уф}=(\lambda_2-\lambda_1)$, видимая (ВИ) область спектра (0,38–0,76 мкм) характеризуется величиной $\Delta\lambda_{ви}=(\lambda_3-\lambda_2)$, а инфракрасная (ИК) область спектра имеет три поддиапазона (0.77-2.5 мкм), (3.0-5.0 мкм) и (8.0-12.0 мкм), включающие $\Delta\lambda_{ик1}=(\lambda_4-\lambda_3)$, $\Delta\lambda_{ик2}=(\lambda_5-\lambda_4)$ и $\Delta\lambda_{ик3}=(\lambda_6-\lambda_5)$. В данных спектральных участках может быть расположено некоторое множество зон регистрации лучистого потока $\{M\}$

$$M=\{\Delta\lambda_1,\Delta\lambda_2,\ldots,\Delta\lambda_i,\ldots,\Delta\lambda_k\}. \qquad (1)$$

В выражении (1), значение ширины зоны регистрации лучистого потока может принимать различные значения от $\Delta\lambda_{min}$ до $\Delta\lambda_{max}$. Будем считать, что для любого спектрального участка, используемая ширина зоны регистрации $\Delta\lambda_i=\Delta\lambda_{max}$ характеризует случай, когда охватывается весь спектральный участок, например, ВИ области спектра.

Формируемые разноспектральные изображения могут быть получены путем регистрации лучистого (светового) потока в отдельных зонах $\{M\}$ внутри отдельных спектральных участков $\Delta\lambda_{уф}$, $\Delta\lambda_{ви}$, $\Delta\lambda_{ик1}$, $\Delta\lambda_{ик2}$ или $\Delta\lambda_{ик3}$ или определенных их комбинаций, а также разноспектральные изображения могут быть сформированы путем регистрации в широких спектральных участках, например, с использованием всей ВИ области спектра $\Delta\lambda_{ви}$, средней ИК области спектра $\Delta\lambda_{ик2}$ и дальней ИК области спектра $\Delta\lambda_{ик3}$, как показано в таблице 1.

Таблица 1.

Комбинации участков (зон) регистрации	Спектральные участки (зоны) регистрации лучистого (светового) потока в системах наблюдения объектов, мкм				
	$\Delta\lambda_{уф}$ (0,25–0,38)	$\Delta\lambda_{ви}$ (0,38–0,76)	$\Delta\lambda_{ик1}$ (0,76–2,50)	$\Delta\lambda_{ик2}$ (3,0–5,0)	$\Delta\lambda_{ик3}$ (8,0–12,0)
	Варианты используемого числа участков (зон) регистрации лучистого (светового) потока, *m*				
1.	1	1	-	-	-
2.	1	-	1	-	-
3.	1	-	-	1	-
4.	1	-	-	-	1
n	----------				
n+1	-	1	1	-	-
n+2	-	1	-	1	-
n+3	-	1	-	-	1
n+4	-	1	-	1	1
m	----------				
m+1	-	2	1	-	-
m+2	-	3	-	1	-
m+3	-	3	1	-	1
m+4	-	2	1	2	-
m+5	-	2	2	2	-
m+6	-	3	1	-	2
k	----------				

Минимальное число участков (зон) регистрации лучистого (светового) потока равно величине m=2, а максимальное число может быть значительным, то есть $m=k$.

В настоящее время не существует единого алгоритма объединения разноспектральных изображений. В существенной степени это связано с тем, что оценка качества предъявляемых изображений является субъективной и зависит от психофизиологических особенностей оператора, решаемой задачи и условий наблюдения.

Недостатком известных работ, посвященных вопросам синтеза изображений, является то, что рассматриваются полутоновые изображения с определенным числом градаций яркости, полученные в различных зонах (участках) оптического спектра, которые не имеют привязки к чему-либо, например, в отрыве от учета распределения спектральных характеристик объектов в УФ, ВИ и ИК областях спектра. Учет амплитудных значений сигналов разноспектральных изображений с их распределением в интервале длин волн от λ_1 до λ_n мог бы служить базовой опорой для выбора способа обработки и выборки наиболее информативных участков, содержащихся в отдельных разноспектральных изображениях с их последующим переносом в результирующее изображение.

Под эффективным объединением разноспектральных изображений здесь понимается формирование результирующего изображения, в котором содержатся объекты, присутствующие только в каких-то отдельных изображениях, а не во всех. Если считать, что с целью обеспечения требуемой информативности изображений, необходимой для принятия обоснованных решений, повышения точности и быстродействия работы и снижения утомляемости наблюдателя (оператора), то предъявляемое объединенное изображение должно обеспечивать следующее:

- отображение основной информации, содержащейся в исходных разноспектральных ТВ и ТПВ изображениях;
- максимально точную привязку разноспектральных ТВ и ТПВ изображений;
- выделение (подчеркивание) изображений объектов в соответствие с решаемой задачей (по яркости, цвету и т.д.).

Общий критерий объединения разноспектральных изображений

Механизм селекции и различения объектов в изображениях зависит от многих факторов. Важную роль в этом процессе, при зрительном восприятии оптических изображений (ОИ), играют спектрально-энергетические признаки (СЭП) и пространственные признаки (ПП) объектов, которые могут быть постоянными или изменяться по каким-либо причинам в течение некоторого интервала времени Δt. Попарно сравнивая все объекты изображения между собой, можно выявить их различие только по ПП или СЭП, или отсутствие этих различий по отдельным признакам.

Исходная различительная информация в ОИ между i и j-объектами в отдельном изображении может быть представлена в виде величины разности по СЭП и ПП при сравнении объектов между собой

$$\Delta X_{i,j}=(X_i-X_j),\ \Delta У_{i,j}=(У_i-У_j), \qquad (2)$$

или для всего многокомпонентного ОИ

$$\Delta X=\sum_{i,j=1}^{s}(\Delta X_{i,j}),\quad \Delta У=\sum_{i,j=1}^{s}(\Delta У_{i,j}). \qquad (3)$$

Учитывая (2) и (3) примем, что исходная различительная информация, которая есть в ОИ, может быть представлена в виде суммы различительной информации по СЭП и ПП [3]

$$\Delta J_{исх}(x,y)=(\Delta X+\Delta У). \qquad (4)$$

Учитывая (4), для разных зон регистрации лучистого (светового) потока $\Delta\lambda_i \in M$ и формируемых разноспектральных изображений, можно записать, что

$$\Delta J_{\Delta\lambda i}(x,y)=(\Delta X+\Delta У)_{\Delta\lambda i}\,. \qquad (5)$$

Принимая во внимание (5) можно оценить величину формируемой различительной информации в отдельном разноспектральном изображении относительно другого для решения задач спектральной селекции, захвата и сопровождения целевых объектов $\{N\}$

$$\Delta R_{i,j}(x,y) = \left| \Delta J_{\Delta\lambda i}(x,y) - \Delta J_{\Delta\lambda j}(x,y) \right|, \qquad (6)$$

а для всех разноспектральных изображений при использовании i-способа их объединения в одно результирующее изображение

$$\Delta R_i(k) = \sum_{i,j=1}^{k} (\Delta R_{i,j}), \qquad (7)$$

где k – общее число объединяемых разноспектральных изображений.

Оценку пригодности (эффективности) тех или иных способов обработки и объединения разноспектральных изображений, обладающих совокупностью апостериорных признаков и параметров для решения задач спектральной селекции объектов, можно производить только на основе определенных критериев. В общем случае критерий оценки должен быть интегральным, может позволять производить сопоставительную оценку качества способов обработки сигналов и их объединения, быть простым и удобным практически.

Для оценки эффективности объединения нескольких разноспектральных изображений в одно результирующее изображение введем понятие критерий максимума различительной информации, в виде

$$\Delta R_i(k) \rightarrow max. \qquad (8)$$

Введенный критерий максимума различительной информации позволяет оценить следующее:

- эффективность способов обработки сигналов, которые доставляют большую различительную информацию по принятым признакам;
- потерю количества различительной информации за счет несогласованности i-способа обработки сигналов с объектами наблюдения по СЭП и ПП;
- общее количество различительной информации, которое может получить потребитель по СЭП и ПП, а также по дополнительным признакам объектов в наблюдаемых изображениях, которое определяет информативность результирующего разноспектрального изображения.

Введение критерия, учитывающего количество различительной информации в отдельном разноспектральном изображении, относительно другого, для

решения задач спектральной селекции объектов позволит осуществлять выбор оптимальных алгоритмов обработки для объединения разноспектральных изображений.

Разработка способа объединения разноспектральных изображений

Формирование объединенного сигнала разноспектрального изображения можно осуществить различными способами. При этом могут быть разные ситуации. Обычно объект селекции наблюдается на фоне другого объекта. Каждый из них может иметь определенную яркость, цвет и отражательную (излучательную) способность. Так, например, различие между объектом и фоном будет фиксироваться зрительным анализатором человека, если контраст по яркости между ними превышает некоторую пороговую величину

$$k_1 = (B_i - B_j)/B_i \geq \varepsilon, \qquad (9)$$

ε – порог контрастной чувствительности глаза, принимается равный величине $0{,}01 \leq \varepsilon \leq 0{,}02$.

Согласно (9), различение одного объекта на фоне другого возможно в том случае, если контраст между ними будет выше минимально допустимого контраста.

Рассмотрим пример, когда регистрация лучистого (светового) потока осуществляется в трех спектральных участках оптического спектра с использованием всей ВИ области спектра (0,38-0,76 мкм) – $\Delta\lambda_{ви}$, средней ИК области спектра (3-5 мкм) – $\Delta\lambda_{ик2}$ и дальней ИК области спектра (8-12 мкм) – $\Delta\lambda_{ик3}$. Пусть в поле зрения разноспектральной ТВ/ТПВ камеры находятся три произвольных класса объектов *A*,*B*,*C* на фоне объекта *D* в трех спектральных участках регистрации лучистого потока, имеющих ход спектральных характеристик как показано на рисунке 1.

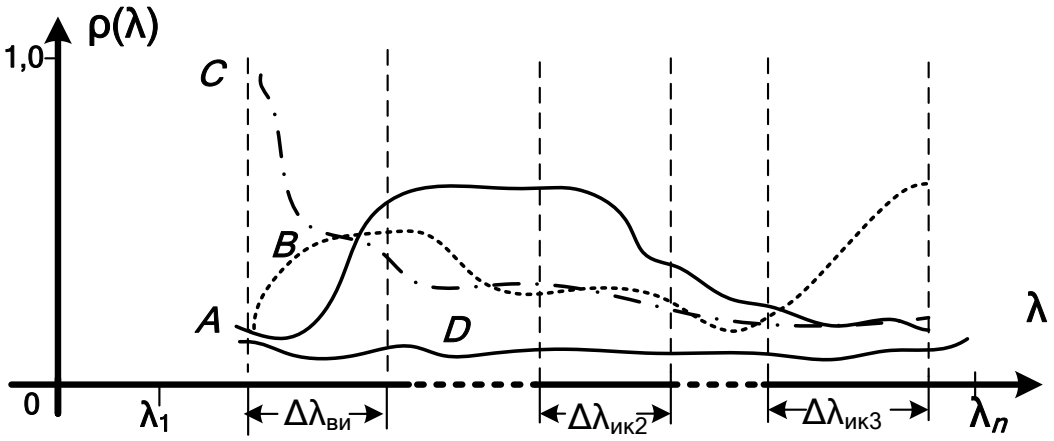


Рис. 1. Спектральные характеристики ИК-диапазонов.

На рисунке 2 показана структурная схема системы объединения разноспектральных сигналов изображений с использованием АП, СЭП и ПП объектов.

Таблица 2.

n/n	Используемые признаки для селекции и объединения нескольких разноспектральных изображений		
	Амплитудные признаки	Спектрально-энергетические признаки	Пространственные признаки
1.	+	-	-
2.	+	+	-
3.	+	-	+
4.	+	+	+

Число формируемых сигналов разноспектральных изображений может быть равно величине $2 \leq k \leq S$. В данной схеме селекция сигналов объектов может осуществляться по АП, СЭП и ПП – раздельно или совместно в определенных комбинациях (таблица 2). Обозначения: коммутатор (К), отображающее устройство (ОУ), измеритель параметров сигналов (ИПС).

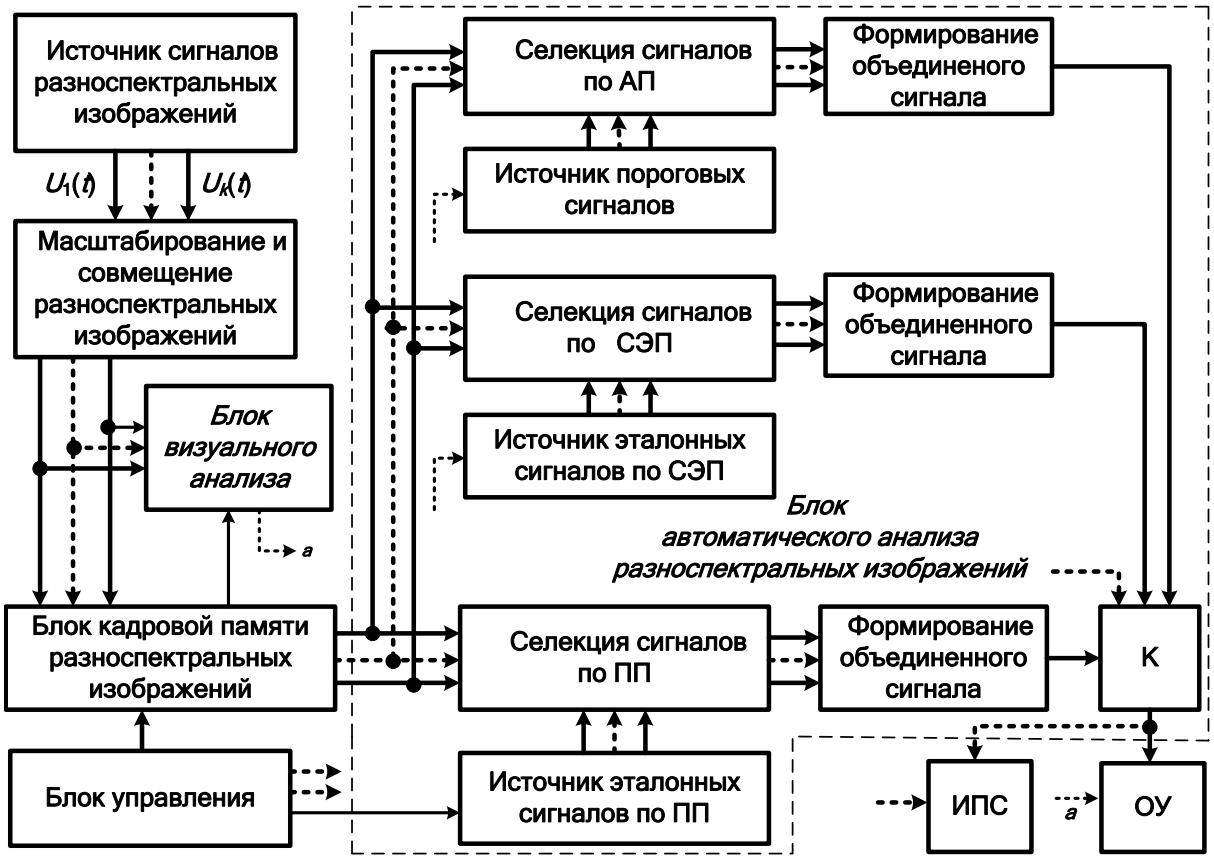


Рис. 2. Структурная схема системы объединения разноспектральных сигналов изображений с использованием АП, СЭП и ПП объектов.

На рисунке 3 показан принцип построчной селекции сигналов с выделением максимальной амплитуды сигнала изображения для трех разноспектральных изображений, полученных в различных участках спектра, со спектральными характеристиками объектов как было показано на рисунке 1.

Здесь сигнал изображения *i*-строки растра, для примера, $U_1(t)$ соответствует ВИ области спектра $\Delta\lambda_{ви}$, $U_2(t)$ – средней ИК области спектра $\Delta\lambda_{ик2}$ и $U_3(t)$ – дальней ИК области спектра $\Delta\lambda_{ик3}$.

На рисунке 4 показано результирующее разноспектральное изображение объектов класса *A*, *B* и *C* на фоне объекта *D*, сформированное на основе разноспектральных изображений, полученных в трех спектральных участках регистрации лучистого потока.

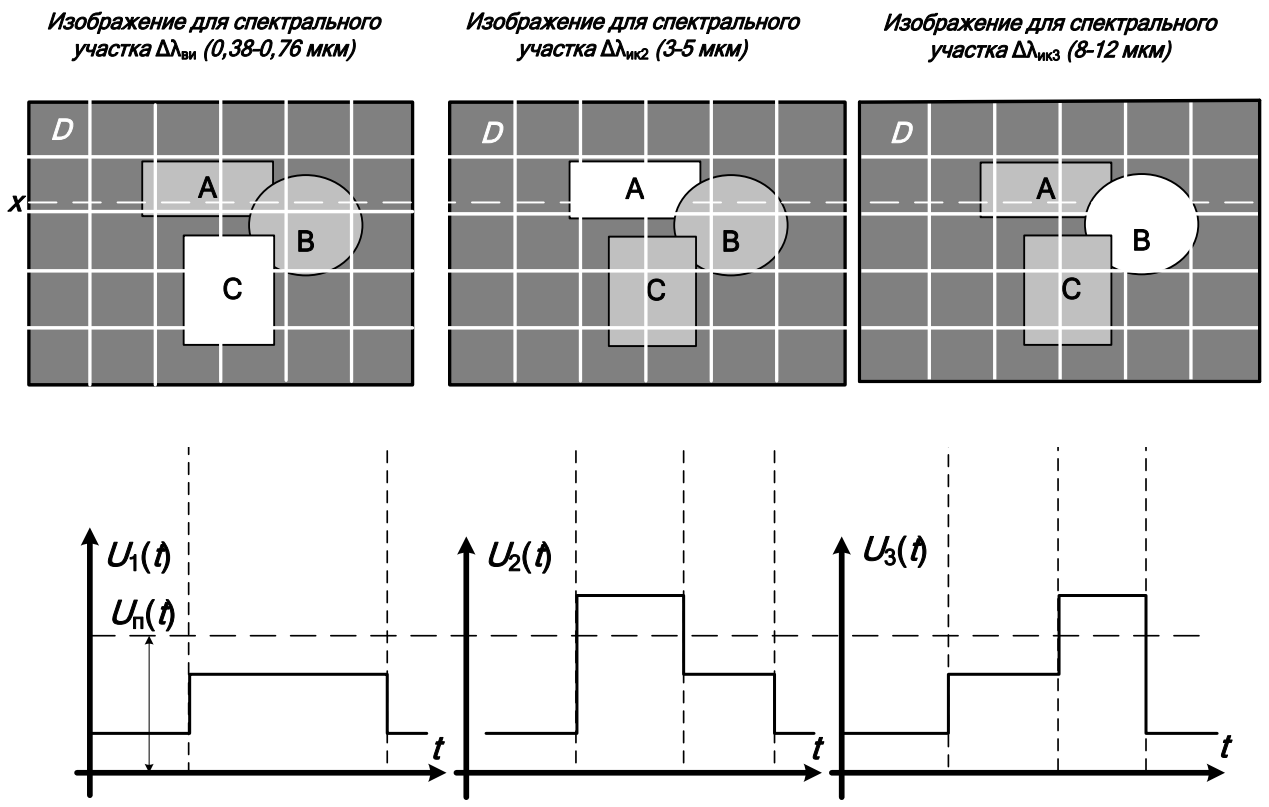


Рис. 3. Принцип построчной селекции сигналов с выделением максимальной амплитуды сигнала изображения *i*-строки для трех разноспектральных изображений.

Особенности распределения спектрально-энергетических характеристик объектов в УФ, ВИ и ИК областях спектра позволило ввести термин «спектральный портрет» объектов для их некоторого множества $\{N\}$ [4]. Рассмотрим особенности подхода к определению спектрального портрета объекта (СПО) и его возможном практическом применении в системах видеонаблюдения объектов.

Использование некоторого множества зон $\{M\}$, включающего зоны регистрации лучистого (светового) потока $\Delta\lambda_1,\ldots,\Delta\lambda_i,\ldots,\Delta\lambda_k$ 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 определенной области спектра или распределение сигналов по полю отдельных разноспектральных ТВ/ТПВ изображений.

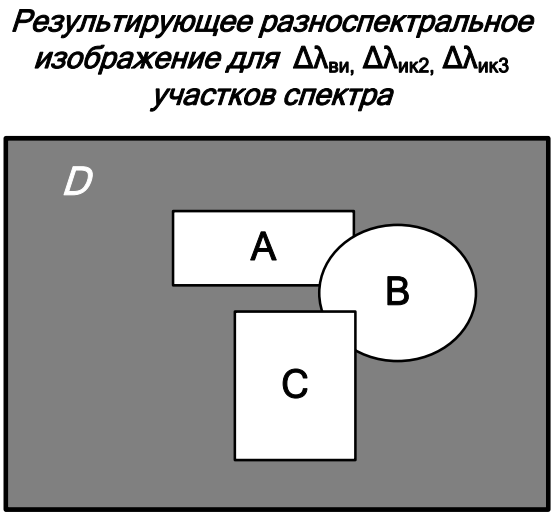


Рис. 4. Вариант результирующего изображения объектов класса *A, B* и *C* на фоне объекта *D* на основе выделения объектов максимальной яркости в каждом участке (зоне) регистрации.

В соответствие с рисунком 1, показывающем распределение спектрально-энергетических характеристик трех классов объектов *A*, *B* и *C* на фоне объекта *D*, можно отметить следующее. Для объекта класса *C*, после преобразования лучистого (светового) потока в сигналы разноспектральных изображений с использованием матричных фотоприемников должно выполняться условие так, что

$$U_{\Delta\lambda\text{ви}}(t)>U_{\Delta\lambda\text{ик}2}(t)>U_{\Delta\lambda\text{ик}3}(t). \qquad (11)$$

Для объекта класса *A* должно выполняться условие так, что

$$U_{\Delta\lambda\text{ви}}(t)<U_{\Delta\lambda\text{ик}2}(t)>U_{\Delta\lambda\text{ик}3}(t). \qquad (12)$$

Для объекта класса *B* должно выполняться условие так, что

$$U_{\Delta\lambda\text{ви}}(t)>U_{\Delta\lambda\text{ик}2}(t)<U_{\Delta\lambda\text{ик}3}(t). \qquad (13)$$

Для усиления выполнения условий (11)÷(13) можно дополнительно осуществить попарное сравнение между собой сигналов $U_{\Delta\lambda\text{ик}3}(t)$ и $U_{\Delta\lambda\text{ви}}(t)$. Тогда получим следующее распределение сигналов для объекта класса *C*

$$U_{\Delta\lambda\text{ви}}(t)>U_{\Delta\lambda\text{ик}2}(t)>U_{\Delta\lambda\text{ик}3}(t)<U_{\Delta\lambda\text{ви}}(t), \qquad (14)$$

и соответственно для объектов класса A и B

$$U_{\Delta\lambda\text{ви}}(t)<U_{\Delta\lambda\text{ик}2}(t)>U_{\Delta\lambda\text{ик}3}(t)>U_{\Delta\lambda\text{ви}}(t) \quad (15)$$

$$U_{\Delta\lambda\text{ви}}(t) >U_{\Delta\lambda\text{ик}2}(t)<U_{\Delta\lambda\text{ик}3}(t)>U_{\Delta\lambda\text{ви}}(t) \quad (16)$$

Используя такой подход в оценке распределения амплитудных значений сигналов в разноспектральных изображениях можно выделить только тот объект, для которого выполняется условие (14), (15) или (16). Далее, при формировании результирующего изображения можно добавить изображение объекта i– разноспектрального изображения с априорно заданной спектральной характеристикой, обладающего максимальным значением производного коэффициента – контрастности и отношения сигнал/шум, согласно выражению (10).

На рисунке 5 показано результирующее изображения объекта при учете распределение СЭП, согласно выражению (16) и дополнительном учете ПП (форма объекта в виде круга), путем сравнения текущих разноспектральных изображений с наперед заданными эталонными данными по СЭП и ПП объектов.

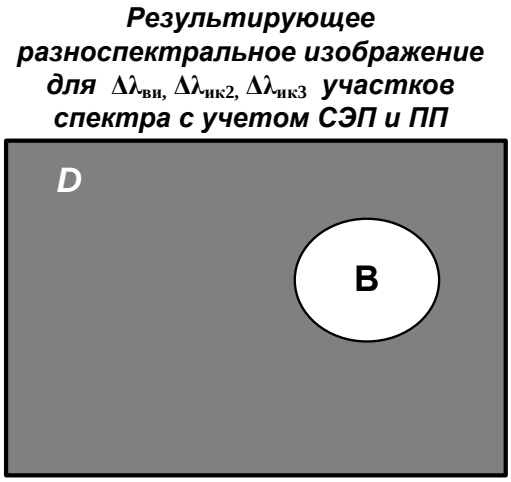


Рис. 5. Результирующее изображение при использовании априорных данных о СЭП и ПП объектов селекции.

Заключение

Для выработки правила объединения нескольких разноспектральных изображений предложен критерий, определяющий достижение максимума различительной информации в результирующем изображении, который будет учитывать возможность нахождения максимального значения произведения двух ве-

личин $\psi(\Delta\lambda_i)\cdot K(\Delta\lambda_i)$ для каждого отдельного разноспектрального изображения и селектируемых сочетаний объект/фон. Иными словами, с каждого разноспектрального изображения добавляются в одно результирующее изображение только те сочетания, объект/фон которые имеют лучшие различительные свойства между собой в *i*-разноспектральном изображении по принятым параметрам.

Разработан способ и структура построения системы, для объединения разноспектральных изображений, на основе использования амплитудных, спектрально-энергетических и пространственных признаков объектов. Объединение сигналов разноспектральных изображений, получаемых в тех или иных участках (зонах) регистрации, например, в ВИ и ИК областях спектра, позволяет сформировать результирующее изображение, обладающее большей информативностью для различения и селекции заданных классов объектов. Введенное понятие спектрального портрета объектов и его использование имеет свое важное практическое применение для решения задач обнаружения, селекции и распознавания многокомпонентных изображений с формированием результирующих сигналов, предназначаемых для визуального или автоматического анализа разноспектральных изображений.

Литература

1. Ковин С.Д., Сагдуллаев Ю.С. Спектрозональное телевидение и тепловидение в задачах идентификации объектов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. Выпуск 2, 2013 г. – С. 123-136.
2. Сагдуллаев Ю.С., Ковин С.Д. Роль числа градаций яркости и цветности в различении объектов многокомпонентных изображений // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. Выпуск 3, 2016. – С. 71-78.
3. Сагдуллаев Ю.С., Ковин С.Д. Восприятие и анализ разноспектральных изображений // М.: «Спутник +», 2016. – 251 с.
4. Сагдуллаев Ю.С., Ковин С.Д. Спектральный портрет объектов многокомпонентных изображений. // Материалы научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2016 г. – С. 217-220.

УДК 621.397

Шахрай В.И., к.т.н.
Арзуманян Э.П., д.т.н., с.н.с.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОДНОГО СПОСОБА ПОДГОТОВКИ ЭТАЛОНА В КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМАХ АВТОСОПРОВОЖДЕНИЯ

Рассмотрены вопросы формирования эталона с селекцией информативных зон при корреляционной обработке двумерных полей яркости. Создана математическая модель, позволяющая проводить статистические исследования и составлять оценку эффективности разработанного способа по сравнению с традиционным.

Постановка задачи

В системах автоматического управления нашли широкое применение устройства автосопровождения объектов, основанные на корреляционных методах оценки параметров координатного смещения. Эффективность корреляционных алгоритмов во многом зависит от устойчивости сохранения параметров корреляционной функции в условиях воздействия декоррелирующих факторов, таких как масштабные, ракурсные, яркостные и другие искажения.

Цель представленной работы – показать эффективность разработанного способа формирования эталонного изображения, сохраняющего свои устойчивые параметры в условиях статистической разновидности сюжетов, наличия шумовой составляющей и динамических возмущений в контуре автоматического слежения за выбранным объектом (фрагментом фонового изображения). В качестве оценки эффективности предложено исследовать, при равных условиях эксперимента, статистику устойчивого слежения при предельном отношении сигнал/шум (по критерию срыва непрерывного слежения) для двух способов – предложенного с оригинальным алгоритмом формирования эталона и традиционного, для которого эталонное изображение формируется внутри прямоугольного строба.

Описание предложенного способа

Во многом характеристики корреляционного слежения определяются способами начального формирования эталона, его адаптации и обновления в процессе автосопровождения. В работе [1] описаны устройства автосопровождения, в которых формирование эталона для корреляционного канала выполняется с предварительной селекцией информативных зон. Как правило, наибольший вклад в формирование корреляционной функции вносят элементы изображения с выраженными локальными статистическими признаками. В частности, такими признаками являются яркостные перепады по направлениям, выделяемым с помощью свертки изображений с направленными градиентными масками [2]. Чем больше значение отклика, тем больший вклад данная точка изображения внесет в формирование взаимной корреляционной функции с выраженным максимумом, что является необходимым условием для корреляционного метода слежения. Выделение информационных элементов может быть выполнено по статистическим признакам области изображения, например, с использованием локальной двумерной дисперсия яркости $D(g,h)$ или по значениям экстремума локальной автокорреляционной функции (АКФ) для участков изображения.

Сущность последнего способа подготовки эталона заключается в следующем. Область текущего изображения, ограниченная полем эталона, разбивается на $Ms = G \cdot H$ фрагментов (секций), в каждом из которых вычисляется значение АКФ по курсовым направлениям $A(\varepsilon,\eta,k,l)$. С учетом симметрии АКФ таких курсовых направлений достаточно выбрать 4 из них. Для каждого направления определяется абсолютное значение разности ***dA*** между экстремумом и значением АКФ для фиксированного смещения α, β.

$$dA(\varepsilon,\eta,k,l) = \left|A(\varepsilon,\eta,k,l) - A(\varepsilon+\alpha,\eta+\beta,k,l)\right|, \qquad (1)$$

где α, β – фиксированные смещения по курсовым направлениям; ε, η – смещения по диагонали.

Из полученных для данной секции 4-х значений выбирается минимальное соответствующее направлению с наихудшей корреляцией. Полученные по мере вычисления данные $dA(\varepsilon,\eta,k,l)$ заносятся в таблицу. Для окончательного фор-

мирования эталона из Ms секций изображения выбираются только $Ns = 4$, в которых $dA(\varepsilon, \eta, k, l)$ имеют максимальное значение.

На базе системы Mathcad была разработана математическая модель, позволившая получить сравнительную оценку качества работы коррелятора с вышеописанным и традиционным методами формирования эталона.

Модель формирования входной информации

Модель содержит входное фоновое изображение, в центральной части которого сформировано поле поиска объекта наблюдения, в пределах которого производят все процедуры обработки. Модель входного изображения формирует случайные поля яркости с задаваемыми статистическими параметрами – интервалом корреляции, определяющим межэлементную корреляционную связь, и дисперсией значений яркости [3]. Такой подход позволяет провести моделирование с достаточным количеством реализаций для получения достоверной оценки эффективности.

Исходное изображение синтезируется на основе формулы упреждения [4], используемой как для вертикальной, так и горизонтальной корреляций.

$$fon_{o,p+1} := fon_{o,p} \cdot \rho h +, bv_{o,p} \cdot \sqrt{1 - \rho h^2}\,, \qquad (2)$$

где

– $bv_{o+1,p} := bv_{o,p} \cdot \rho v +, \xi v_{o,p} \cdot \sqrt{1 - \rho v^2}$ – межэлементная корреляционная связь в вертикальном направлении;

– ρv, ρh – нормированные коэффициенты корреляции по вертикали и горизонтали соответственно;

– $\xi v_{o,p}$ – выборка из генератора случайных чисел.

Значения яркости элементов в поле поиска определяются следующим образом:

$$Pp_{i,j} := fon_{i+ci,\, j+cj}\,, \qquad (3)$$

где i, j – переменные координат поля поиска; $ci := \frac{I}{2} + frs$ и $cj := \frac{J}{2} + frc$ – координаты начального смещения поля поиска с учетом необходимого пространства для движения; frs и frc – координатные сдвиги поля поиска, задаваемые функциями синусного и косинусного движений, соответственно.

Значения яркости элементов в поле эталона определяются как:

$$Pe_{m+g\cdot M,n+h\cdot N} := Pp_{m+\frac{K}{2}+g\cdot M,n+\frac{L}{2}+h\cdot N}\,. \qquad (4)$$

Учитывая разнородную природу и совокупность источников аппаратного и теплового шумов, существующих в аппаратуре, в модели сформирован некоррелированный по времени шум с гауссовой плотностью распределения. Двумерный шум формируют преобразованием последовательности выборок от генератора случайных чисел в двумерный массив. Отношение сигнал/шум **ψ** зашумленного изображения определяется отношением среднеквадратических отклонений (СКО) яркости исходного изображения ***Pp*** и шума ***br***:

$$\psi := \frac{\mathrm{stdev}(Pp)}{\mathrm{stdev}(br)+\Delta}\,, \qquad (5)$$

где Δ – малая величина для предотвращения деления на ноль; stdev – оператор среднеквадратического отклонения.

При проведении моделирования приняты конкретные параметры алгоритма формирования исходной информации и эталона:

$O=128\ ;\ P=128$ – *размеры входного изображения;*

$o=0..O-1\ ;\ p=0..P-1$ – *переменные координат входного изображения;*

$I=64\ ;\ J=64$ – *размеры поля поиска;*

$i=0..I-1\ ;\ j=0..J-1$ – *переменные координат поля поиска;*

$K=32\ ;\ L=32$ – *размеры поля эталона;*

$k=0..K-1\ ;\ l=0..L-1$ – *переменные координат поля эталона;*

$M=8\ ;\ N=8$ – *размеры секции в поле эталона;*

$m=0..M-1\ ;\ n=0..N-1$ – *переменные координат секции в поле эталона;*

$G=4\ ;\ H=4$ – *количество секций;*

$g=0..G-1\ ;\ h=0..H-1$ – *координаты расположения секций.*

На рисунке 1 приведено изображение синтезируемого изображения с отображением границ полей поиска и эталона.

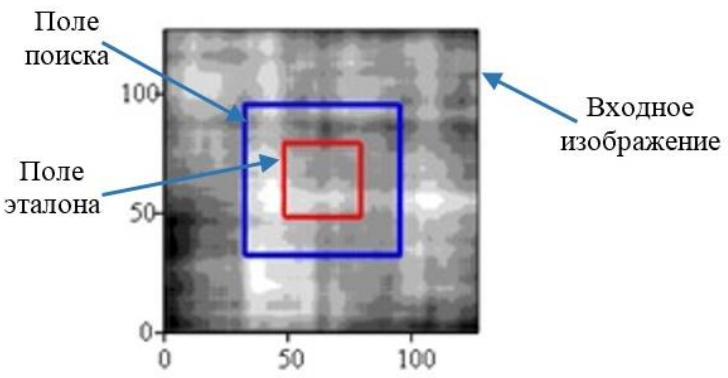


Рис. 1. Иллюстрация границ полей поиска и эталона.

Как правило, эталон формируют в пределах прямоугольного строба в центре поля. В исследуемом способе поле эталона разбивают на фрагменты (секции) для выбора информативных областей, используемых в дальнейшем для корреляционного слежения.

В модели также предусмотрено движение фонового изображения, что обеспечивает проведение исследований работы алгоритма в динамическом режиме. Движение может быть осуществлено либо по одной из осей координат, либо по кругу.

Модель алгоритма формирования эталона

В данной модели для оценки координатного смещения используется критериальная разностная функция. Используя индексную математику, вычисляются значения критериальной функции $Kr_{g,h}$ при сдвигах на один шаг в каждом направлении внутри каждой секции.

По результатам данной операции определяют значения откликов, полученные в каждой секции поля эталона.

Первый шаг из 16-и выполняется с индексами «0 0» следующим образом:

$$Kr_{g,h} := \frac{1}{M \cdot N} \cdot \left[\sum_m \sum_n \left| \left(Pp_{m+\delta u_g + \mathbf{0} \cdot M + \frac{K}{2}, n+\delta v_h + \mathbf{0} \cdot N + \frac{L}{2}} \right) - \left(Pp_{m+\mathbf{0} \cdot M + \frac{K}{2}, n+\mathbf{0} \cdot N + \frac{L}{2}} \right) \right| \right] \quad (6)$$

$$\boldsymbol{Kr} = \begin{pmatrix} 17.123 & 16.209 & 17.109 & 16.209 \\ 9.278 & 0 & 8.362 & 0 \\ 15.974 & 14.363 & 15.22 & 14.363 \\ 9.278 & 0 & 8.362 & 0 \end{pmatrix},$$

где $\delta u_g := \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ $\delta v_h := \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ индексы сдвига (в данном случае на один шаг) для каждой секции эталонного изображения.

В качестве примечания следует отметить, что с целью сокращения количества переменных при вычислении ***Kr*** используются переменные ***g*** и ***h***, в результате чего матрица откликов получилась с избытком. Для наглядности основная информативная часть заключена в рамке, а лишние строка и столбец повторяют уже имеющиеся данные, что не влияет на результаты дальнейших процедур обработки.

Второй шаг – с индексами «1 0» и т. д.

$$Kr_{g,h} := \frac{1}{M \cdot N} \cdot \left[\sum_m \sum_n \left| \left(Pp_{m+\delta u_g+1\cdot M+\frac{K}{2},n+\delta v_h+0\cdot N+\frac{L}{2}} \right) - \left(Pp_{m+1\cdot M+\frac{K}{2},n+0\cdot N+\frac{L}{2}} \right) \right| \right] \tag{7}$$

$$Kr = \begin{pmatrix} 14.091 & 7.522 & 12.32 & 7.522 \\ 11.542 & 0 & 11.573 & 0 \\ 12.986 & 8.551 & 16.32 & 8.551 \\ 11.542 & 0 & 11.573 & 0 \end{pmatrix}$$

Последующие индексы присваиваются по следующей закономерности:

$$\begin{pmatrix} 00 & 01 & 02 & 03 \\ 10 & 11 & 12 & 13 \\ 20 & 21 & 22 & 23 \\ 30 & 31 & 32 & 33 \end{pmatrix}$$

Далее, в соответствии с алгоритмом выбора устойчивых точек, выделяются все значения минимумов критериальной функции, найденные в цикле вычислений ***Kr,*** из которых необходимо выбрать четыре экстремума. Поскольку функция ***Kr*** содержит нули, вследствие вычитания эталона из собственной начальной позиции, выполняется следующая операция после чего можно определить истинные минимумы функции ***Kr***:

$$Krp_{g,h} := if\,(Kr_{g,h} = 0, \max(Kr), Kr_{g,h}), \tag{8}$$

тогда матрица минимумов $mi_{g,h}$ определится следующим образом:

$$mi_{g,h} := \min(Krp) \tag{9}$$

$$mi = \begin{pmatrix} 8.362 & 12.301 & 9.552 & 8.634 \\ 7.522 & 9.077 & 7.072 & 10.224 \\ 7.771 & 8.015 & 6.034 & 5.513 \\ 10.809 & 13.048 & 7.192 & 10.042 \end{pmatrix}$$

Таким образом, матрица (8) содержит минимумы АКФ для каждой из 16 секций поля эталона. Следующим шагом в процессе обработки является нахождение 4-х максимумов из матрицы минимумов. Для этого преобразовывают матрицу минимумов в вектор miv,

$$miv_{g+4\cdot h} := mi_{g,h} \ , \tag{10}$$

затем извлекают из него вектор максимумов длиной в четыре значения

$$mirs := reverse(sort(miv)) \tag{11}$$

$mirs_g =$

13.048
12.301
10.809
10.224

, где оператор «***sort***» осуществляет сортировку данных в порядке возрастания, а «***reverse***» – в обратном порядке.

Далее, окончательно определяют расположение 4-х секции в поле эталона. Для этого используют оператор условного перехода «**if**» («**если**»).

$$\begin{aligned} Et_{0_{g,h}} &:= \mathrm{if}\,(mi_{g,h} = mirs_0, mi_{g,h}, 0); \\ Et_{1_{g,h}} &:= \mathrm{if}\,(mi_{g,h} = mirs_1, mi_{g,h}, 0); \\ Et_{2_{g,h}} &:= \mathrm{if}\,(mi_{g,h} = mirs_2, mi_{g,h}, 0); \\ Et_{3_{g,h}} &:= \mathrm{if}\,(mi_{g,h} = mirs_3, mi_{g,h}, 0); \\ Et_{g,h} &:= Et_{0_{g,h}} + Et_{1_{g,h}} + Et_{2_{g,h}} + Et_{3_{g,h}}, \end{aligned} \tag{12}$$

где $Et_{g,h}$ – расположение эталонных секций в поле эталона по выбранным признакам устойчивого слежения.

$$Et = \begin{pmatrix} 0 & 12.301 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10.224 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10.809 & 13.048 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Поле эталона с выбранными секциями вычисляется следующим условным оператором:

$$et_{m+g\cdot M, n+h\cdot N} := \left| \begin{array}{ll} 0 \text{ if } Et_{g,h} = 0 & \\ Pe_{m+g\cdot M, n+h\cdot N} & otherwise \end{array} \right. . \tag{13}$$

На рисунке 2 представлен массив данных поля эталона ***Pe*** и выделенные в соответствии с (13) активные секции эталона ***et.*** Для сравнения на этом же рисунке представлен и эталон прототипа **ET**.

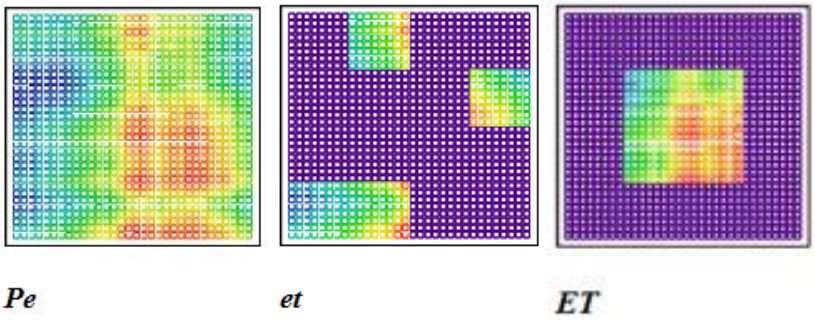


Рис. 2. Расположение выбранных секций эталона.

Модель автосопровождения

Вычисление критериальной функции является определяющей процедурой при оценке эффективности предложенного способа. Методически выбраны два режима автосопровождения:

– режим без наложения шума, но с большим интервалом корреляции (ρv, ρh) синтезированных случайных полей яркости;
– режим с аддитивным шумом, но при меньших значениях интервала корреляции.

Критериальная функция для двух сравниваемых вариантов представляется следующим образом:

$$Rkr'_{r,s} := \frac{1}{K \cdot L \cdot 4}\left(\sum_k \sum_l \left|Pp_{k+r,l+s} \cdot et'_{k,l} - et_{k,l}\right|\right), \tag{14}$$

$$Rkr''_{r,s} := \frac{1}{K \cdot L \cdot 4}\left(\sum_k \sum_l \left|Pp_{k+r,l+s} \cdot ET'_{k,l} - ET_{k,l}\right|\right), \tag{15}$$

где

$$et'_{k,l} := \left|sign\left(et_{k,l}\right)\right| \text{ и } ET'_{k,l} := \left|sign\left(ET_{k,l}\right)\right|, \tag{16}$$

маскирующие сигналы для разработанного варианта (14) и прототипа (15).

Дальнейшая процедура сравнения заключается в следующем:

– запускают движение модели в соответствии с сигналами ***frs*** и ***frc***, следящий контур включен;

– при одной и той же реализации случайного изображения фиксируют моменты срыва непрерывного слежения для обоих сравниваемых вариантов.

Для определения срыва сравнивают координаты движения изображения ***ci, cj*** с координатами *Dk, DL*, отработанными контуром слежения с учетом задержки на один кадр, как это имеет место в реальной аппаратуре.

$$DK := \sum_r \sum_s \left[\left(\min\left(Rkr\right) = Rkr_{r,s} \right) \cdot r \right];$$
$$DL := \sum_r \sum_s \left[\left(\min\left(Rks\right) = Rks_{r,s} \right) \cdot s \right], \qquad (17)$$

где $Rkr_{r,s} := Rkr'_{r,s} \vee Rkr''_{r,s}$ и $Rks_{r,s} := Rks'_{r,s} \vee Rks''_{r,s}$ в зависимости от испытуемого варианта.

В идеальном случае сигналы $wk := ci + DK$ и $wl := cj + DL$, характеризующие синхронность слежения по отношению к сигналам движения изображения, должны быть константой, однако с учетом допустимых флуктуаций в контуре слежения принята небольшая пороговая величина δ, превышение которой считается недопустимым. Таким образом, признак срыва непрерывного слежения за объектом наблюдения определяется следующим условным оператором:

$$test := \left| \begin{array}{l} \text{"СЛЕЖЕНИЕ"} \ \text{if} \left(\left| wk' - wk \right| < \delta \wedge \left| wl' - wl \right| < \delta \right) \\ \text{"СРЫВ"} \ \ otherwise \end{array} \right. , \qquad (18)$$

где wk' и wl' – предыдущие значения величин wk и wl; во всех прогонах модели принято $\delta = 5$.

Результаты математического моделирования

В качестве критерия оценки качества автосопровождения для различных методов формирования эталона принята вероятность срыва при непрерывном слежении. При этом эксперименты проводились для статистических сюжетов с различными ***ρv*** и ***ρh*** при различных отношениях сигнал/шум.

На рисунке 3 приведены наглядные фрагменты работы модели в динамическом режиме слежения с аддитивным шумом: а) – положение стробов в начале целеуказания и критериальная функция в соответствующем моменте работы и б) – случайный срыв слежения.

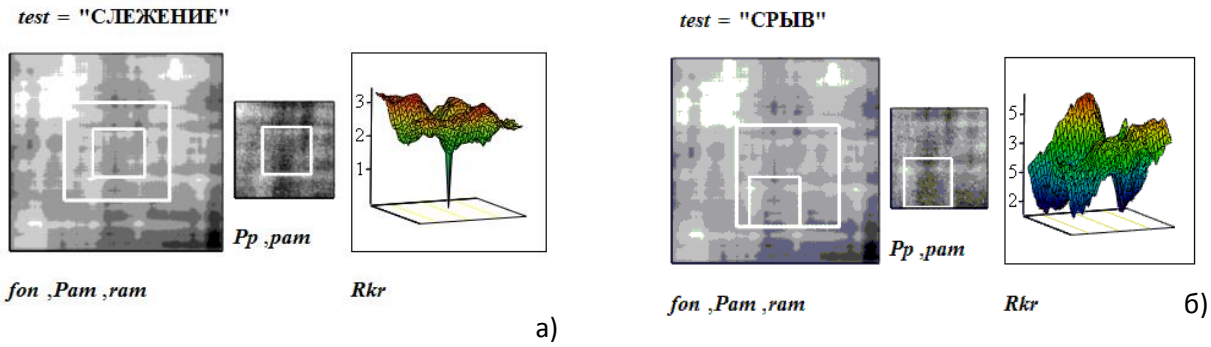


Рис. 3. Иллюстрация отдельных фрагментов работы модели.

На рисунке 4 представлены аналогичные иллюстрации без шумовой составляющей: а) – начальное целеуказание и б) – момент максимального сдвига.

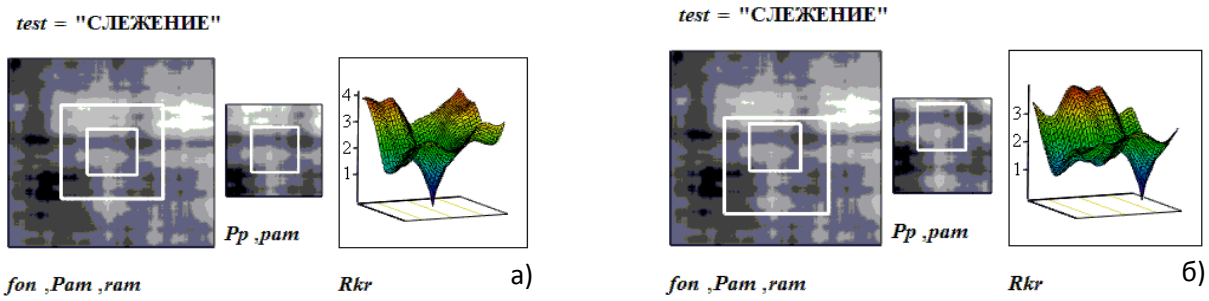


Рис. 4. Иллюстрация отдельных фрагментов работы модели.

В таблице 1 приведены результаты 3000 прогонов модели с двумя различными интервалами корреляции статистической картины и пятью уровнями шума по 600 прогонов на каждом уровне с тремя различными реализациями статистических полей.

В графе «Оценка эффективности» показано во сколько раз прототип срывался чаще. Для наглядного представления о сигнале ψ, из модели взят коэффициент α-множитель шумовой составляющей. В графе «Примечания» значки * и ** показывают результаты прогонов, отличающиеся от закономерных.

Таблица 1.

ρ(*v*, *h*)	α	№ эксперимента	Вариант стат. реализации	ψ	Кол-во кадров	Кол-во срывов		Оценка эффективности	Примечания
						Основной	Прототип		
0,97	0,55	1.	1	1,86	200	9	55	6	
		2.	2	2,28	200	1	12		
		3.	3	2,02	200	1	0		*
	0,6	4.	1	1,847	200	0	2	6	
		5.	2	1,774	200	5	18		
		6.	3	1,81	200	1	16		
0,9	0,55	7.	1	1,925	200	0	2	4	
		8.	2	1,99	200	1	2		
		9.	3	1,924	200	0	0		**
	0,6	10.	1	1,823	200	2	0	2	*
		11.	2	1,858	200	0	0		**
		12.	3	1,826	200	0	4		
	0,8	13.	1	1,332	100	2	7	4	
		14.	2	1,28	100	0	0		**
		15.	3	1,318	100	7	7		**
		16.	4	1,348	100	4	34		
		17.	5	1,306	100	0	6		
		18.	6	1,37	100	1	4		

В таблице 2 приведены результаты 600 прогонов модели без наложения шума.

Таблица 2.

ρ(*v*, *h*)	α	№ эксперимента	Кол-во кадров	Кол-во срывов		Оценка эффективности	Примечания
				Основной	Прототип		
0,98	0	19.	100	0	8	1,93	
		20.	100	13	17		
		21.	100	0	4		
		22.	100	0	8		
		23.	100	13	18		
		24.	100	5	2		*
		25.	100	6	11		
		26.	100	0	0		**
		27.	100	0	4		
		28.	100	6	11		

Заключение

1. Рассмотрены вопросы формирования эталона с селекцией информативных зон, и создана математическая модель для исследования его эффективности.
2. Проведено математическое моделирование процесса корреляционного автосопровождения с алгоритмом формирования эталона в динамичном контуре непрерывного слежения за объектом наблюдения.
3. Проведенные исследования показали высокую эффективность рассмотренного метода формирования эталона, обеспечившего повышение качества автосопровождения по критерию вероятности срыва в 4,4 раза по сравнению с традиционным вариантом.

Литература

1. Шахрай В.И, Арзуманян Э.П. Телевизионные автоматы сопровождения объектов. // НТ сборник «Техника средств связи», серия Техника телевидения. – М.: АО «МНИТИ», 2000 г. – С. 80-84.
2. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.
3. Жовинский В.Н., Арховский В.Ф. Корреляционные устройства. – М.: «Энергия», 1974. – 248 с.
4. Арзуманян Э.П., Жовинский В.Н., Фомин Ю.А. Вероятностная модель нестационарного двумерного телевизионного поля. // «Техника средств связи», серия Техника телевидения. Выпуск 3. – М., 1976 г. – С. 82-88.

УДК 631

Сухачев А.Б., д.т.н.
Шапиро Б.Л.
Перчаткин Н.А.

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕДУРЫ ОБМЕНА ИНФОРМАЦИЕЙ ПО РАДИОКАНАЛУ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ БЛА

В статье рассматриваются варианты обмена информацией в системах управления беспилотными летательными аппаратами (БЛА) и приводится описание соответствующих моделей.

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) в настоящее время широко используются для решения разноплановых задач в военном деле и в народном хозяйстве. Одна из важнейших задач, решаемых БЛА, – мониторинг подстилающей поверхности с помощью аппаратуры, входящей в состав полезной нагрузки БЛА. Фактор наличия полномасштабного обмена информацией с заданным качеством присущ всем без исключения видам систем управления БЛА и является одним из основополагающих для обеспечения выполнения целевой функции комплекса управления БЛА в целом.

Обмен информацией в системах управления БЛА осуществляется по радиолиниям. Лимит массы полезной нагрузки и энергетических ресурсов БЛА накладывают существенные ограничения на мощность радиопередающих устройств. Поэтому для обеспечения связи на значительные расстояния в каналах связи систем управления БЛА, как правило, используются остронаправленные антенны.

Модель процедуры организации обмена информацией в системе управления БЛА. При системном подходе к решению задачи оптимизации критерий эффективности для систем управления БЛА может быть определен как максимум вероятности выполнения целевой функции комплексом управления БЛА [1].

В обобщенном виде, в предположении независимости событий, вероятность выполнения целевой функции комплексом управления БЛА можно записать

$$P = \prod_{i=1}^{n} p_i \to Max. \quad (1)$$

В зависимости от вида БЛА и конкретных задач, поставленных в полетном задании, состав факторов, влияющих на вероятность выполнения целевой функции и их вероятностей p_i, может изменяться. В то же время, фактор наличия полномасштабного обмена информацией с заданным качеством присущ всем без исключения видам систем управления БЛА и является одним из основополагающих для обеспечения выполнения целевой функции комплекса управления БЛА в целом.

Процедура организации обмена информацией в системе управления БЛА может быть представлена в виде функциональной схемы (рисунок 1).

Вероятность обеспечения обмена информацией с заданным качеством в системе управления БЛА описывается выражением

$$P_{\text{ИНФ ОБМ}} = f(A; B; C; \theta; E; F) \to Max, \quad (2)$$

Результирующая функция оценки эффективности Э для системы обмена информацией БПЛА может быть представлена двухфакторной мультипликативной моделью

$$Э = x_{\text{СВ}} \cdot x_{\text{АСН}}, \quad (3)$$

где $x_{\text{СВ}}$ – показатель эффективности, характеризующий наличие устойчивой связи в системе обмена информацией (рисунок 1); $x_{\text{АСН}}$ – показатель эффективности, характеризующий устойчивость системы АСН к воздействию перерывов связи (рисунок 1) Значения показателей эффективности оцениваются как вероятности соответствующих событий.

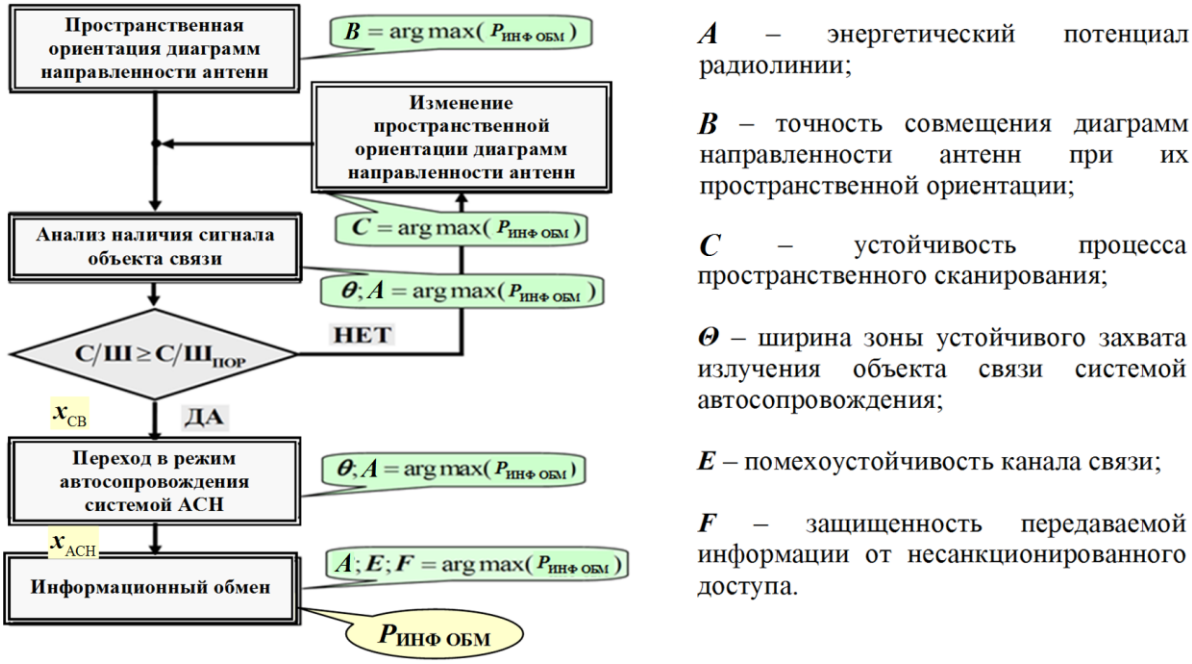


Рис. 1. Функциональная схема модели процедуры организации обмена информацией в системе управления БЛА.

Вероятностная модель процедуры организации обмена информацией в системе управления БЛА. Рассматриваемая модель описывает процедуру вхождения в связь БЛА и пункта управления (ПУ). В случае применения в радиолинии остронаправленных антенн на БЛА и на ПУ (или только на ПУ) важной составляющей обеспечения вхождения в связь и поддержания устойчивой связи является проблема, связанная с пространственной ориентацией их диаграмм направленности (ДН). Случай применения остронаправленных антенн как на борту БЛА, так и на ПУ является наиболее сложным с точки зрения организации взаимной пространственной ориентации их ДН. Задача взаимного нацеливания ДН приемо-передающих антенн в системах связи рассмотрена в работах [2, 3]. Вероятностная модель процедуры организации обмена информацией в системе управления БЛА [2-6] применима для исследования процесса вхождения в связь для систем управления БЛА независимо от способа старта последнего (наземного или воздушного). Пример расположения объектов «***A***» и «***B***» с остронаправленными антеннами при рассмотрении модели процедуры организации обмена информацией в системе управления БЛА приведен на рисунке 2.

При рассмотрении модели обмена информацией в системе управления БЛА вводятся следующие начальные условия:

– объекты связи ««*A*» и «*B*» представлены как некоторые точечные объекты, центры масс которых совпадают с центрами ДН антенн;

– объекты связи «*A*» и «*B*» располагаются в пространстве в некоторой зоне рассеивания (неопределенности), параметры которой σ_0 определяются вероятностными характеристиками рассеивания объектов относительно центра зоны неопределенности;

– оба объекта «*A*» и «*B*» имеют антенны, ДН которых либо перекрывают зону рассеивания (неопределенности) объекта, с которым должна быть установлена связь (для случая слабонаправленных антенн), либо имеющие возможность осуществлять сканирование зоны неопределенности объекта связи (для случая остронаправленных антенн);

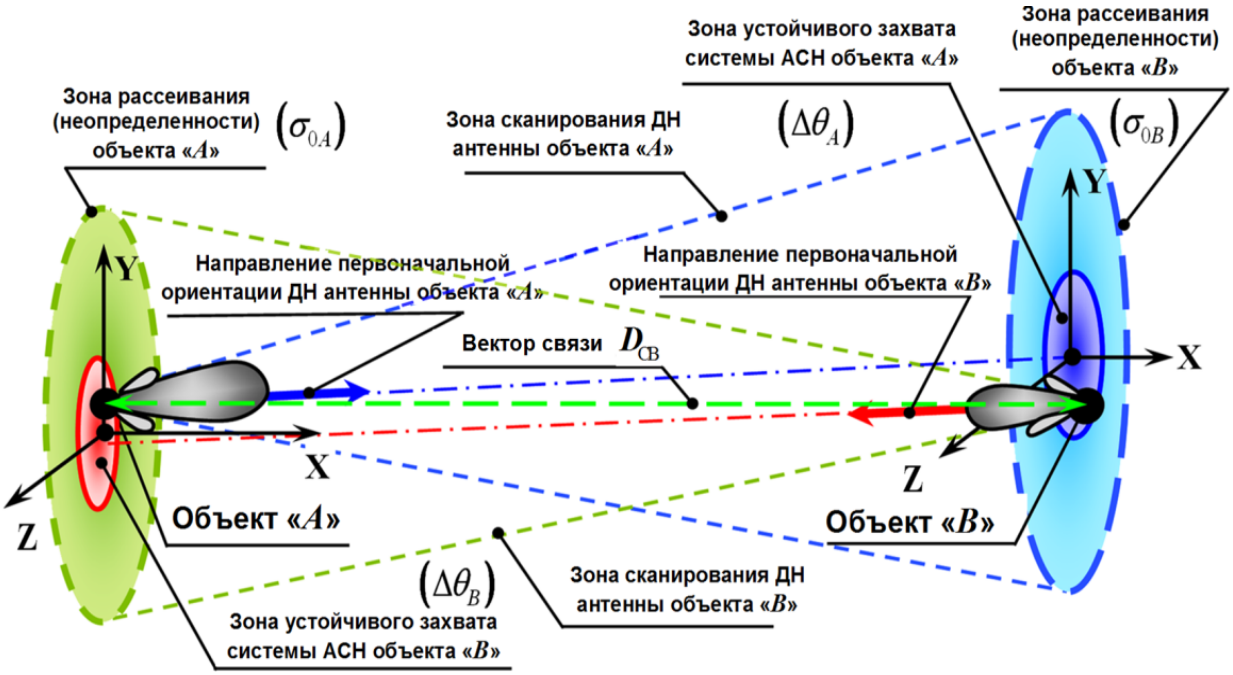


Рис. 2. Пример расположения объектов «*A*» и «*B*» с остронаправленными антеннами при рассмотрении модели процедуры организации обмена информацией в системе управления БЛА.

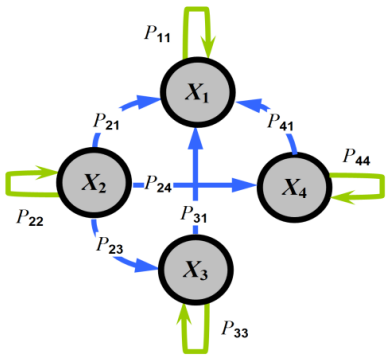
– на основе априорных сведений к моменту начала сеанса связи ДН антенн обоих объектов оказываются сориентированными на центры зон рассеивания (неопределенности) объектов связи;

– передатчики обоих объектов к моменту начала сеанса связи излучают сигналы непрерывно, и вероятность их отказа пренебрежимо мала;

– радиоприемные системы объектов снабжены системой автосопровождения излучения по направлению (системой АСН);
– в случае попадания излучения объекта связи в зону устойчивого захвата системы АСН $\Delta\theta$ обеспечивается уверенный прием информации и устойчивое слежение за объектом;
– энергетика радиолиний связи между объектами «***A***» и «***B***» (мощности передатчиков, чувствительность приемников, усиление антенн) достаточна для обеспечения приема информации с заданным качеством на рассматриваемой дальности связи.

Использование вероятностной модели обмена информацией в системе управления БЛА, основанное на применении математического аппарата теории поглощающих марковских цепей, рассмотрено в [2-6].

Рассмотрим вероятностную модель марковского типа, описывающую процесс вхождения в связь двух объектов «***A***» и «***B***», оснащенных остронаправленными антеннами (рисунок 3), которая имеет четыре состояния $\boldsymbol{X}_1, \boldsymbol{X}_2, \boldsymbol{X}_3, \boldsymbol{X}_4$.



$$\mathbb{P} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & 0 & p_{33} & 0 \\ p_{41} & 0 & 0 & p_{44} \end{pmatrix}$$

Рис. 3. Граф и матрица перехода вероятностной модели, описывающей процесс вхождения в связь двух объектов с остронаправленными антеннами.

<u>Состоянию</u> $\boldsymbol{X}_1$ соответствует случай, когда ДН антенн объектов «***A***» и «***B***» совпадают по направлениям с достаточной точностью, и оба приемника обнаруживают сигналы. Излучение объекта «***A***» попадает в зону устойчивого захвата системы АСН объекта «***B***», а излучение объекта «***B***» – в зону устойчивого захвата АСН объекта «***A***». Системы АСН объектов «***A***» и «***B***» переходят в режим устойчивого автосопровождения: **установлена двухсторонняя связь.**

Состоянию $\boldsymbol{X}_2$ соответствует случай, когда ДН антенн объектов «***A***» и «***B***» ориентированы случайным образом, сигналы приемниками не обнаруживаются: **связь отсутствует.**

Состоянию $\boldsymbol{X}_3$ соответствует случай, когда ДН антенны объекта «***A***» сориентирована на объект «***B***», и сигнал последнего обнаруживается приемником объекта «***A***». Система АСН объекта «***A***» переходит в режим автосопровождения. ДН антенны объекта «***B***» сориентирована в направлении объекта «***A***», но его сигналы приемником объекта «***B***» не обнаруживаются: **двухсторонняя связь отсутствует**.

Состоянию $\boldsymbol{X}_4$ соответствует случай, аналогичный состоянию $\boldsymbol{X}_3$, но с переменой ролей между объектами «***A***» и «***B***»: **двухсторонняя связь отсутствует.**

Состояния $\boldsymbol{X}_2, \boldsymbol{X}_3, \boldsymbol{X}_4$ в соответствии с теорией поглощающих марковских цепей [2, 3] – невозвратные, то есть такие, для которых возможен переход в некоторое другое состояние, но в то же время возврат из этого другого состояния в первоначальное невозможен. Для невозвратного состояния x_i вероятность перехода в некоторое другое состояние $x_j : p_{ij} > 0$. Однако, вероятность возврата из состояния x_j в состояние $x_i : p_{ji} = 0$.

Состояние $\boldsymbol{X}_1$ – поглощающее, то есть такое состояние, в которое процесс может войти из любого невозвратного состояния, но выйти из него не может. Для поглощающего состояния x_i вероятности перехода подчиняются условиям: $p_{ii} = 1, p_{ij} = 0$.

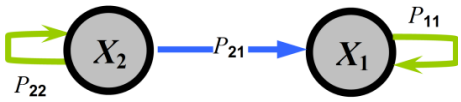
Вероятностная модель марковского типа за определенное время (число шагов) стремится перейти в поглощающее состояние $\boldsymbol{X}_1$, которое соответствует установлению устойчивой двухсторонней связи, для чего переходит из одного невозвратного состояния в любое другое невозвратное состояние за исключением предыдущих или переходит в поглощающее состояние (рисунок 3).

Исходя из физических условий процесса вхождения в связь двух объектов, имеющих остронаправленные антенны, можно утверждать, что с вероятностью, близкой к единице, процесс начнется из состояния $\boldsymbol{X}_2$ (полное отсутствие связи) [2-6]. Следовательно, среднее время до попадания в поглощающее состояние модели (до установления в системе двухсторонней связи) составляет

$$t_{СВСР} = \frac{p_{41} \cdot p_{31} + p_{23} \cdot p_{41} + p_{24} \cdot p_{31}}{(p_{21} + p_{23} + p_{24}) \cdot p_{41} \cdot p_{31}} \cdot \tau \,, \qquad (4)$$

где τ – масштабный коэффициент, учитывающий инерционность системы.

Рассмотренную выше вероятностную модель можно также применить для анализа процесса вхождения в связь двух объектов, когда на одном из них (например «***A***») установлена остронаправленная антенна, а на другом («***B***») – слабонаправленная антенна (рисунок 4).



$$\mathbb{P} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ p_{21} & p_{22} \end{pmatrix}$$

Рис. 4. Граф и матрица перехода вероятностной модели, описывающей процесс вхождения в связь двух объектов, на одном из которых установлена остронаправленная антенна, а на другом – слабонаправленная антенна.

Вероятностная модель (рисунок 4) имеет два состояния, из которых состояние $\boldsymbol{X}_2$ – невозвратное, а состояние $\boldsymbol{X}_1$ – поглощающее.

<u>Состоянию</u> $\boldsymbol{X}_1$ соответствует случай, когда излучение объекта «***B***» попало в зону устойчивого захвата системы АСН объекта «***A***», и его приемник обнаружил сигнал. Система АСН объекта «***A***» переходит в режим автосопровождения объекта «***B***». Приемник объекта «***B***» также обнаруживает сигнал объекта «***A***»: **установлена двухсторонняя связь**.

<u>Состоянию</u> $\boldsymbol{X}_2$ соответствует случай, когда излучение объекта «***B***» не попало в ДН антенны объекта «***A***». Приемники объектов «***A***» и «***B***» сигналов не обнаруживают. **Связь отсутствует**.

Среднее время до попадания в поглощающее состояние (установления в системе двухсторонней связи) для модели системы, состоящей из двух объектов, на одном из которых установлена остронаправленная антенна, а на другом – слабонаправленная антенна (рисунок 4), составляет [2-6]

$$t_{СВСР} = \tau/(1 - p_{22}) = \tau/p_{21} \;. \qquad (5)$$

Вероятность установления двухсторонней связи в системе за минимальное время соответствует вероятности перехода системы связи из состояния полного отсутствия связи, минуя промежуточные состояния, в состояние устойчивой

двухсторонней связи [2-6]. Для модели в соответствии с графом (рисунок 3) это эквивалентно переходу из состояния $\boldsymbol{X}_2$, минуя состояния $\boldsymbol{X}_3$ и $\boldsymbol{X}_4$, в состояние $\boldsymbol{X}_1$.

В [2, 3, 7] показано, что процесс поиска объектов может быть представлен в виде стационарного Пуассоновского потока, характеристикой которого является параметр интенсивности $\gamma_Э$.

Вероятность хотя бы одного обнаружения для стационарного Пуассоновского потока описывается выражением

$$W = 1 - \exp(-\gamma_Э t). \tag{6}$$

Для стационарного Пуассоновского потока [2, 3, 7, 8] характерно, что если система находится в *i*-м состоянии, то вероятность изменения этого состояния p_{ij} с точностью до малых высших порядков равна интенсивности потока обнаружений, т.е. $p_{ij} = \gamma_Э$.

С учетом изложенного, вероятности перехода p_{ij} из одного состояния модели (рисунок 3) в другое для случая применения двух остронаправленных антенн составляет

$$p_{21} = p_{31} = p_{41} = 1\big/\ln\left[1 - W_A(\sigma_{0B}) \cdot W_B(\sigma_{0A})\right]^{-1};\ p_{23} = 1\big/\ln\left\{1 - W_A(\sigma_{0B}) \cdot [1 - W_B(\sigma_{0A})]\right\}^{-1};$$
$$p_{24} = 1\big/\ln\left\{1 - W_B(\sigma_{0A}) \cdot [1 - W_A(\sigma_{0B})]\right\}^{-1}. \tag{7}$$

где $W_A(\sigma_{0B})$– вероятность захвата излучения объекта «***B***» АСН объекта «***A***»; $W_B(\sigma_{0A})$– вероятность захвата излучения объекта «***A***» АСН объекта «*B*»; σ_{0A} и σ_{0B}– СКО рассеивания объектов «***A***» и «***B***» соответственно.

Вероятность перехода p_{ij} модели (рисунок 4) в поглощающее состояние для случая применения в системе связи одной остронаправленной (объект «***A***») и одной слабонаправленной (объект «***B***») антенн можно записать

$$p_{21} = 1\big/\ln\left[1 - W_A(\sigma_{0B})\right]^{-1}, \tag{8}$$

где $W_A(\sigma_{0B})$ – вероятность захвата излучения объекта «***B***» АСН объекта «***A***»; $W_B(\sigma_{0A}) \cong 1{,}0$ – вероятность захвата излучения объекта «***A***» АСН объекта «*B*».

С учетом (4,5,7,8) можно получить оценку минимального времени до попадания в поглощающее состояние (установления в системе двухсторонней связи) для рассматриваемой модели:

– системы связи с использованием двух остронаправленных антенн на объектах «***A***» и «***B***» (рисунок 3)

$$t_{\text{СВ}min} = \tau \cdot \ln\left[1 - W_A\left(\sigma_{0B}\right) \cdot W_B\left(\sigma_{0A}\right)\right]^{-1}; \qquad (9)$$

– системы связи с использованием остронаправленной антенны на объекте «***A***» и слабонаправленной на объекте «***B***» (рисунок 4)

$$t_{\text{СВ}min} = \tau \cdot \ln\left[1 - W_A\left(\sigma_{0B}\right)\right]^{-1}. \qquad (10)$$

Оценка значений вероятности захвата излучения объекта «***B***» АСН объекта «***A***» $W_A\left(\sigma_{0B}\right)$ и вероятности захвата излучения объекта «***A***» АСН объекта «*B*» $W_B\left(\sigma_{0A}\right)$ могут быть получены путем математического моделирования процесса пространственной ориентации диаграмм направленности остронаправленных антенн на основе вероятностной модели в предположении, что распределения положений объектов связи «***A***» и «***B***» в плоскости, перпендикулярной вектору связи, подчиняются закону нормального распределения.

Поскольку объекты связи в системе управления БЛА в процессе полета подвергаются воздействию достаточно большого количества некоррелированных между собой случайных факторов, определяющих их пространственное положение, и подчиняющихся нормальному закону распределения, то, согласно [8], можно считать, что вероятность рассеивания объектов связи «***A***» и «***B***» (рисунок 2) в плоскости, перпендикулярной вектору их скорости, определяется двумерной случайной величиной, подчиняющейся двумерному нормальному закону распределения.

ДН антенн объектов «***A***» и «***B***» к моменту начала вхождения в связь могут быть предварительно сориентированы в направлении центров зон рассеивания соответствующих объектов, поэтому можно для удобства расчетов считать распределение $\varphi(x, y)$ центрированным, т.е. $x_0 = y_0 = 0$.

В то же время, поскольку ни один из случайных векторов, воздействующих на объекты «***A***» и «***B***» в плоскости, перпендикулярной вектору их скорости, не является доминирующим, можно приближенно считать распределение рассеивания объектов нормальным круговым распределением, для которого справедливо равенство $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_0$ [8].

Расположение объектов «***A***» и «***B***» в плоскости, перпендикулярной вектору их скорости, может быть описано случайным вектором $\vec{\boldsymbol{R}}$. Известно [8], что если случайный вектор $\vec{\boldsymbol{R}}$ подчиняется двумерному нормальному круговому цен-

трированному распределению, то случайная величина r, представляющая собой модуль вектора $\vec{\boldsymbol{R}}$, подчиняется закону Рэлея.

Вероятность попадания точечного источника излучения в зону устойчивого захвата системы АСН, сечение которой представляет собой круг радиусом $\Delta\theta/2$ [4-6], описывается выражением

$$W(\sigma_0;\Delta\theta)=1-\exp\left[-(1/2)\cdot(\Delta\theta/2\sigma_0)^2\right], \qquad (11)$$

где $\Delta\theta$ − ширина зоны устойчивого захвата системы АСН; σ_0 – СКО объекта связи относительно центра зоны его рассеивания.

Для обеспечения инвариантности модели к характеристикам конкретных антенн и систем АСН введем значение приведенного СКО $\sigma_{\text{ПР}}=\sigma_0/\Delta\theta$ [4-6]. Для объектов связи «***A***» и «***B***» (рисунок 2) значения приведенного СКО составляют

$$\sigma_{\text{ПР}\boldsymbol{A}}=(\sigma_{0\boldsymbol{A}}/\Delta\theta_{\boldsymbol{B}})- \text{ для объекта "}\boldsymbol{A}\text{"};\ \sigma_{\text{ПР}\boldsymbol{B}}=(\sigma_{0\boldsymbol{B}}/\Delta\theta_{\boldsymbol{A}})- \text{ для объекта "}\boldsymbol{B}\text{"}. \qquad (12)$$

С учетом (10 и 11), вероятность попадания излучения объекта «***B***» в зону устойчивого захвата системы АСН объекта «***A***» составляет

$$W_{0B}(\sigma_{\text{ПР}B})=1-\exp\left[-(1/8)\cdot(1/\sigma_{\text{ПР}B})^2\right]. \qquad (13)$$

Аналогично вероятность попадания излучения объекта «***A***» в зону устойчивого захвата системы АСН объекта «***B***» составляет

$$W_{0A}(\sigma_{\text{ПР}A})=1-\exp\left[-(1/8)\cdot(1/\sigma_{\text{ПР}A})^2\right]. \qquad (14)$$

С учетом принятого допущения, что для слабонаправленной антенны ее ДН перекрывает зону рассеивания (неопределенности) объекта, с которым должна быть установлена связь, вероятность приема сигнала для объекта, оснащенного слабонаправленной антенной составляет $W_0(\sigma_{\text{ПР}})\cong 1{,}0$.

Вероятность установления устойчивой связи в системе управления БЛА (одновременного попадания объекта «***A***» в зону устойчивого захвата системы АСН объекта «***B***» и объекта «***B***» – в зону устойчивого захвата системы АСН объекта «*A*») для системы связи с использованием двух остронаправленных антенн на объектах «***A***» и «***B***» с учетом (13 и 14) определяется выражением

$$W_{0\,\text{СИСТ}}(\sigma_{\text{ПР}A};\sigma_{\text{ПР}B}) = W_{0A}(\sigma_{\text{ПР}A})\cdot W_{0B}(\sigma_{\text{ПР}B}) = \left\{1\text{-}\exp\left[\left(\text{-}1/8\right)\cdot\left(1/\sigma_{\text{ПР}A}\right)^2\right]\right\}\cdot\left\{1\text{-}\exp\left[\left(\text{-}1/8\right)\cdot\left(1/\sigma_{\text{ПР}B}\right)^2\right]\right\}. \quad (15)$$

Вероятность установления устойчивой связи в системе управления БЛА для системы связи с использованием одной остронаправленной антенны на объекте «***A***» и слабонаправленной антенны на объекте «***B***» определяется выражением

$$W_{0\,\text{СИСТ}}(\sigma_{\text{ПР}B};1) \cong W_{0B}(\sigma_{\text{ПРВ}}) = \left\{1\text{-}\exp\left[\left(\text{-}1/8\right)\cdot\left(1/\sigma_{\text{ПР}B}\right)^2\right]\right\}. \quad (16)$$

Уточнение параметров моделей должно проводиться на основе статистической обработки результатов полунатурных и натурных испытаний реальных объектов.

Выводы

Предложенная вероятностная модель процедуры организации обмена информацией в системе управления беспилотными летательными аппаратами инвариантна к типу антенн, которыми оснащены объекты связи.

Модель позволяет проводить оценку вероятностных характеристик процедуры организации обмена информацией в системах управления БЛА и системах связи с подвижными объектами с использованием остронаправленных антенн, а также в системах связи с использованием на одном объекте связи остронаправленной антенны, а на другом – слабонаправленной антенны.

Литература

1. Сухачев А.Б. Исследование возможности оптимизации параметров комплекса управления БЛА с точки зрения обеспечения устойчивого двухстороннего обмена информацией. // Вестник Академии военных наук, № 3 (28) 2009 (спецвыпуск), Москва. – С. 38-42.
2. Казаков В.А. Введение в теорию марковских процессов и некоторые радиотехнические задачи. – М.: Советское радио, 1971. – 416 с.
3. Амиантов И.Н. Избранные вопросы статистической теории связи. – М.: Советское радио, 1973. – 232 с.
4. Сухачев А.Б. Исследование процесса вхождения в связь в комплексах управления беспилотными летательными аппаратами. // «Вопросы обо-

ронной техники». Серия 9, ОАО «ЦНИИ АГ», выпуски 2 (254), 3 (255), 2012. – С 96-101.
5. Сухачев А.Б., Рукин А.П. Формирование вероятностной модели процедуры организации обмена информацией в системе управления беспилотными летательными аппаратами // Информационно-измерительные и управляющие системы Том 14, № 2. – М.: Издательство «Радиотехника», 2016. – С. 19-27.
6. Сухачев А.Б. Применение статистических методов для оценки характеристик системы связи с использованием остронаправленных антенн в комплексах управления беспилотными летательными аппаратами // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. Выпуски 1, 2, 2011. – С. 32-36.
7. Абчук В.А., Суздаль В.Г. Поиск объектов. – М.: Советское радио, 1977. – 336 с.
8. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.

УДК 004.932

Травина Е.И., к.т.н.
Шахрай В.И., к.т.н.

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ПРОТЯЖЁННЫМИ ОБЪЕКТАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕПЕРНОГО АЛГОРИТМА АВТОСОПРОВОЖДЕНИЯ

В статье приводится описание работы автоматов слежения за различными типами объектов при использовании реперных алгоритмов, а также результаты их моделирования.

Для обеспечения захвата и автосопровождения различных классов объектов, включая точечные или малоразмерные, протяженные, а также объекты с простой и со сложной яркостной структурой, в ЗАО МНИТИ разработаны многорежимные автоматы слежения [1]. В процессе слежения структура автомата

адаптируется к изменениям вида объекта слежения и фоновой обстановки. В автомате алгоритмически реализованы следующие режимы автосопровождения: центроидный (Ц), корреляционный (Кр), реперный (Р). Для сохранения ориентации линии визирования оптико-электронной системы (ОЭС) при пропадании оптического контакта с объектом в структуру алгоритма введен режим экстраполяции и инерционного слежения.

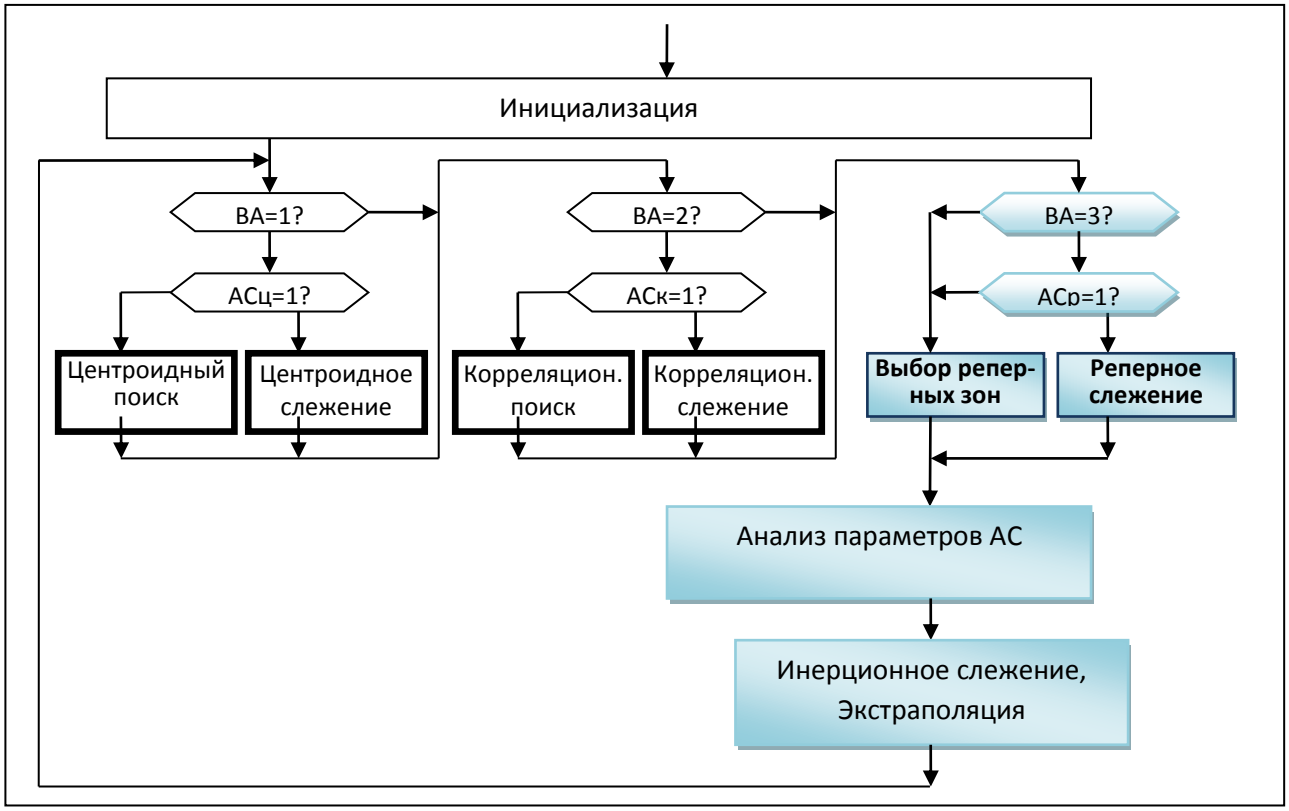


Рис. 1. Укрупненная блок-схема алгоритма многорежимного автомата.

Первые два режима, центроидный и корреляционный, обеспечивают наилучшие характеристики при слежении за малоразмерным объектом или его деталью. В этом случае ведущим алгоритмом блока является, соответственно центроидный (ВА=1) или корреляционный (ВА=2) алгоритмы. Однако, при слежении за протяженными объектами с однородной яркостной структурой или при отсутствии в районе точки прицеливания информационных элементов, средний квадрат ошибки оценки координат с помощью этих алгоритмов резко возрастает, что может привести к срыву при слежениях. В этом случае ведущим алгоритмом становится реперный (ВА=3). Реперный режим обеспечивает слежение за выбранной оператором точкой с использованием в качестве эталонов локальных участков изображения с наилучшими информационными характери-

стиками. В качестве критерия информативности при выборе реперов могут быть использованы: уровень локальной яркостной дисперсии, гистограммные признаки, значения откликов двумерных фильтров. Отметим, что реперный режим является основным в вертолетной системе точного висения, обеспечивая как привязку вертолета к заданной точке на местности, так и слежение за грузом на внешней подвеске [2].

На последовательности ТВ кадров осуществляется автосопровождение каждого из реперов следящими стробами путем нахождения координат экстремума корреляционной функции (КФ) участков текущего изображения с соответствующими эталонами. При сближении оптико-электронной системы с объектом наблюдения участки реперных зон на изображении смещаются к периферии и могут достигать границ растра. В этом случае автоматически производится повторный выбор и захват новых реперов с сохранением положения точки слежения на момент перезахвата.

В рассмотренных системах вычисление координат точки слежения на текущих кадрах осуществляется по измеренным в каналах слежения координатам реперов методом геометрического подобия с использованием информации о взаимном положении координат реперов и точки слежения на кадре выбора и захвата реперов.

В данной статье представлен вариант реализации алгоритма реперного слежения с использованием декомпозиции исходного изображения путем недецимированного вейвлет-преобразования, рассмотренный в работе [3]. Существенное отличие рассматриваемого варианта заключается в том, что итоговой оценкой координатного сдвига точки слежения является совместная оценка координатных сдвигов основного репера и фона, координатный сдвиг которого вычисляется путём объединении корреляционных функций фоновых реперов.

Преобразование исходного изображения выполняется с использованием базисных функций Хаара. Базисные функции Хаара образуют простейшую систему ортогональных вейвлетов, что позволяет применять и обработке быстрые алгоритмы и целочисленные арифметические вычисления [4]. Полученные в результате декомпозиции вейвлет-коэффициенты используются для выбора эталонных фрагментов в исходном изображении. Вейвлет-декомпозиция изображения описывается выражением:

$$\mathbf{A}_{n-1} \xrightarrow{dec} \{\mathbf{A},\ \mathbf{D}\}_n; \quad \mathbf{D}_n = \mathbf{D}_n^h + \mathbf{D}_n^v + \mathbf{D}_n^x; \quad n = \overline{1, N}; \tag{1}$$

где n – уровень декомпозиции; N – глубина декомпозиции, $N=2$;

A – аппроксимирующая составляющая изображения, характеризующая его яркостные свойства;

D' – детализирующая составляющая, включающая в себя матрицы вейвлет-коэффициентов горизонтальной ($\mathbf{D}^h$), вертикальной ($\mathbf{D}^v$) и диагональной ($\mathbf{D}^x$) компонент, характеризующих направленные локальные контрасты. В дальнейших вычислениях используется матрица детализирующей составляющей 2-го уровня декомпозиции $\mathbf{D_2}$.

Выбор координат фоновых реперов в поле матрицы $\mathbf{D_2}$ производится по изменениям соотношений между значениями вейвлет-коэффициентов горизонтальной ($\mathbf{D}^h$) и вертикальной ($\mathbf{D}^v$) компонент детализирующей составляющей. В окрестности координат каждого репера отбирают L элементов матрицы D_2 в соответствии с выражениями:

$$d \in \mathbf{v}^r: \quad |d| > |dmin|, \quad dmin = \mathbf{arg}\left[\sum_{d=dmax}^{d} \mathbf{P}^r(d) \geq L\right], dmax = \mathbf{max}\left(\left|\mathbf{D}_2\right|\right), L = const; \quad (2)$$

где r – идентификатор репера: ($r = 0$) – основной репер, ($r > 0$) – фоновый;

$\mathbf{P}(d)$ – гистограмма матрицы $\mathbf{D}_2$; $\mathbf{v}$ – список значений репера r.

Для оценки качества каждого репера используется разностная автокорреляционная функция (АКФ) $\mathbf{K}^r$, вычисленная для соответствующего фрагмента матрицы $\mathbf{D_2}$:

$$\mathbf{K}^r(\alpha,\beta) = \sum_{l=0}^{L-1}\left|\mathbf{D}_2\left(Y^r + \mathbf{y}_l^r + \alpha, Z^r + \mathbf{z}_l^r + \beta\right) - \mathbf{v}_l^r\right|, \quad (\alpha,\beta) \in \overline{-\delta,\delta}; \quad (3)$$

где $\mathbf{D_2}$ – детализирующая составляющая 2-го уровня декомпозиции; $\mathbf{v}$ – список значений репера r; $\mathbf{y}$, $\mathbf{z}$ – списки смещений значений эталона относительно начального элемента списка $\mathbf{v_0}$; L – количество элементов, составивших эталон, l – номер элемента; δ – размер зоны корреляционного поиска.

Для унификации идентификационных характеристик КФ реперов для каждого репера r вычисляется коэффициент нормирования η.

$$\eta^r = \sum_{l=0}^{L-1}\left|\mathbf{v}_l^r\right|, \quad (4)$$

Возможность использования для слежения нового репера r оценивается

величиной размаха его АКФ (рисунок 2):

$$\Delta^r = \frac{\mathbf{arg\ max}\{\mathbf{P}(k)\}}{\eta^{rep}} \geq \lambda^{\Delta}; \quad k \in \mathbf{K}^r; \tag{5}$$

где **P** – гистограмма значений КФ репера *r*.

В процессе слежения положение каждого репера определяется координатами минимума корреляционной функции Kr:

$$(\tilde{\alpha}\ ,\tilde{\beta}\ )^r = \mathbf{arg\ min}\{\mathbf{K}^r(\alpha,\beta)\}, \quad (\alpha,\beta) \in \overline{-\delta,\delta}; \tag{6}$$

$\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}$ – координатные смещения репера на текущем кадре.

Состояние репера *r* и достоверность его координатных смещений оцениваются при помощи следующих идентификационных характеристик КФ.

Во-первых, значения КФ в точке экстремума (k_{min}):

$$k^r_{min} = \left\{\frac{\mathbf{min}(\mathbf{K}\ )}{\eta}\right\}^r = \mathbf{K}^r(\tilde{\alpha},\tilde{\beta}). \tag{7}$$

Во-вторых, значения размаха КФ в окрестности экстремума (k_ε):

$$k^r_\varepsilon = \mathbf{min}\left\{\frac{\mathbf{K}\ (\alpha,\beta) - k_{min}}{\eta}\right\}^r, \quad \alpha \in \overline{\tilde{\alpha}^r \mp \varepsilon}, \beta \in \overline{\tilde{\beta}^r \mp \varepsilon}; \quad \alpha \neq \alpha^r, \beta \neq \beta^r, \ \varepsilon \leq 2; \tag{8}$$

где ε – размер окрестности экстремума/минимума КФ.

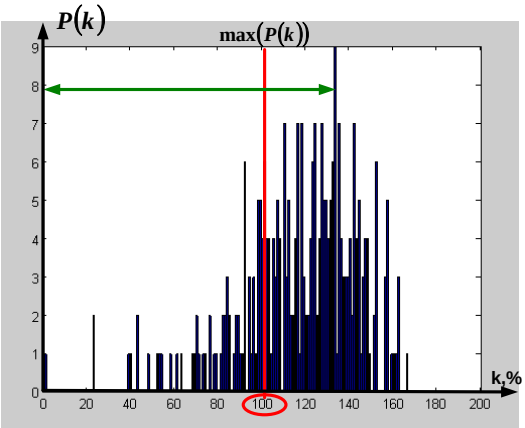


Рис. 2. Оценка размаха разностной корреляционной функции

Репер признаётся локализованным, а его смещения достоверными, если

идентификационные характеристики его КФ, полученные согласно выражениям (7, 8), удовлетворяют условиям:

$$\begin{cases} k_{min}^{r} \le \lambda_{min} \cdot \eta^{r} \\ k \ge \lambda_{\varepsilon} \cdot \eta^{r} \end{cases}, \qquad (9)$$

$$\lambda_{min} \approx 0.7, \quad \lambda_{\varepsilon} \approx 0.0125.$$

Для оценки смещения фона выполняется объединение КФ фоновых реперов:

$$\mathbf{K}^{G} = \sum_{r \in Q} \mathbf{K}^{r}, \quad \eta^{G} = \sum_{r \in Q} \eta^{r}, \quad r \in Q, r \ne 0, \quad \left(\tilde{\alpha}^{G}, \tilde{\beta}^{G}\right) = \mathbf{arg\,min}\left(\mathbf{K}^{G}\right); \qquad (10)$$

где Q – список реперов, локализованных на текущем кадре; $\mathbf{K}^{G}$ – объединённая КФ фоновых реперов ; (α^{G}, β^{G}) – смещение фона.

Реперам, нелокализованым на текущем кадре, присваиваются смещения фона:

$$\alpha^{u} = \alpha^{G}, \quad \beta^{u} = \beta^{G}, \quad u \notin Q. \qquad (11)$$

Координаты репера r на текущем кадре t определяются путём интегрирования межкадровых смещений:

$$Y_{t}^{r} = Y_{t-1}^{r} + \alpha^{r}, \; Z_{t}^{r} = Z_{t-1}^{r} + \beta^{r}, \qquad (12)$$

при этом координаты основного репера ($r=0$) определяют положение точки слежения.

В случае отсутствия в области основного репера выраженных структурных особенностей его корреляционная функция КФ может иметь слабо выраженный экстремум. Это не позволяет однозначно определить координаты точки слежения на текущем кадре из-за хаотичных смещений по величине и знаку, в отличие от стабильных смещений фоновых реперов.

Оценку координат основного репера на текущем кадре можно представить как взвешенную сумму смещений:

$$\begin{cases} \alpha^{0} = \tilde{\alpha}^{0} \cdot w_{\alpha}^{0} + \alpha^{G} \cdot w_{\alpha}^{G} \\ \beta^{0} = \tilde{\beta}^{0} \cdot w_{\beta}^{0} + \beta^{G} \cdot w_{\beta}^{G} \end{cases} \qquad (13)$$

где α^0, β^0 – результирующие смещения основного репера; $\tilde{\alpha}^0, \tilde{\beta}^0$ – смещения основного репера, полученные в результате корреляционного сопоставления согласно выражению (3); α^G, β^G – смещения фона на текущем кадре экстремума/минимума матрицы $\mathbf{K}^G$, полученные согласно (10); w_α, w_β – весовые коэффициенты для смещений в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Весовые коэффициенты вычисляются следующим образом. Для каждого направления строятся распределения значений КФ основного репера:

$$\mathbf{P}^0(\alpha) = \sum_{\beta=-\delta}^{\delta} \mathbf{K}^0(\alpha,\beta), \quad \mathbf{P}^0(\beta) = \sum_{\alpha=-\delta}^{\delta} \mathbf{K}^0(\alpha,\beta), \quad (\alpha,\beta) \in \overline{-\delta,\delta}; \tag{14}$$

и распределения значений объединённой КФ фоновых реперов:

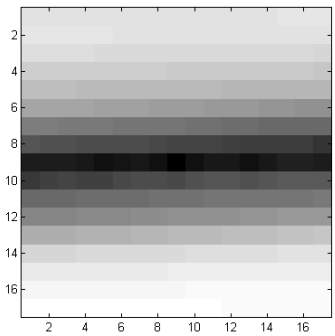
$$\mathbf{P}^G(\alpha) = \sum_{\beta=-\delta}^{\delta} \mathbf{K}^G(\alpha,\beta), \quad \mathbf{P}^G(\beta) = \sum_{\alpha=-\delta}^{\delta} \mathbf{K}^G(\alpha,\beta), \quad (\alpha,\beta) \in \overline{-\delta,\delta}. \tag{15}$$

На рисунке 3 представлены вид и распределение значений автокорреляционных функций основного (а,б) и фоновых (в,г) реперов для протяженного объекта с анизотропной яркостной структурой.

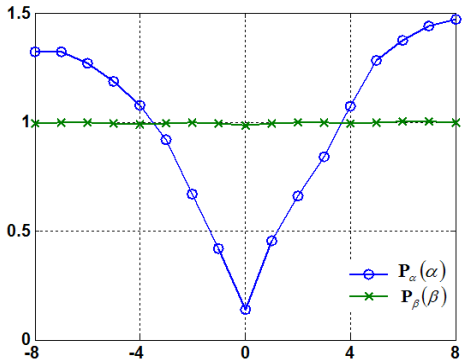
С учетом выражений (14, 15) для каждого направления вычисляются средние отклонения значений КФ основного репера и объединённой КФ фоновых реперов, характеризующие анизотропность корреляционных функций:

$$\gamma \in (\alpha,\beta): \quad \sigma_\gamma = \frac{\sum_{\gamma=-\delta}^{\delta} \left| \mathbf{P}(\gamma) - m_{\alpha\beta} \right|}{(1+2\delta)^2}, \quad m_{\alpha\beta} = \frac{\sum_{\alpha=-\delta}^{\delta} \sum_{\beta=\delta}^{\delta} \mathbf{K}(\alpha,\beta)}{(1+2\delta)^2}; \tag{16}$$

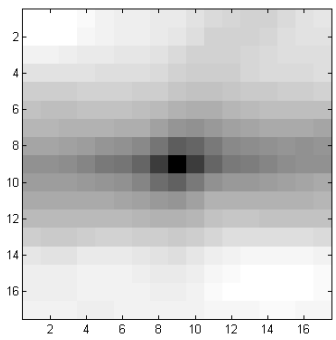
где $\mathbf{K}$ – матрица КФ $\mathbf{K}^0$ или $\mathbf{K}^G$; δ – размер зоны корреляционного поиска.



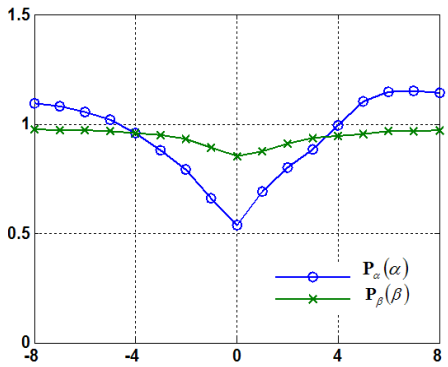
а) АКФ основного репера;



б) распределения значений КФ основного репера ($\mathbf{K}^0$), являющегося фрагментом протяженного образования;



в) объединённая АКФ фоновых реперов;



г) распределения значений фоновой КФ ($\mathbf{K}^G$).

Рис. 3. Распределение значений КФ основного и фоновых реперов.

Средние отклонения используются в качестве весовых коэффициентов выражения (13):

$$w_\alpha^0 = \frac{\sigma_\alpha^0}{\sigma_\alpha^G + \sigma_\alpha^0}, \quad w_\alpha^G = 1 - w_\alpha^0;$$
$$w_\beta^0 = \frac{\sigma_\beta^G}{\sigma_\beta^G + \sigma_\beta^0}, \quad w_\beta^G = 1 - w_\beta^0, \tag{17}$$

где верхний индекс 0 обозначает принадлежность весовых коэффициентов основному реперу; верхний индекс G обозначает принадлежность весовых коэффициентов фоновым реперам.

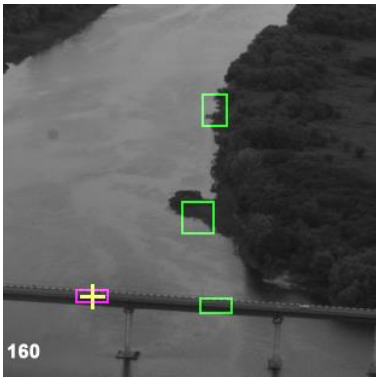
Тогда выражение (14) может быть записано в виде:

$$\begin{cases} \alpha^0 = \alpha^G + w_\alpha^0\left(\tilde{\alpha}^0 - \alpha^G\right) \\ \beta^0 = \beta^G + w_\beta^0\left(\tilde{\beta}^0 - \beta^G\right) \end{cases} \tag{18}$$

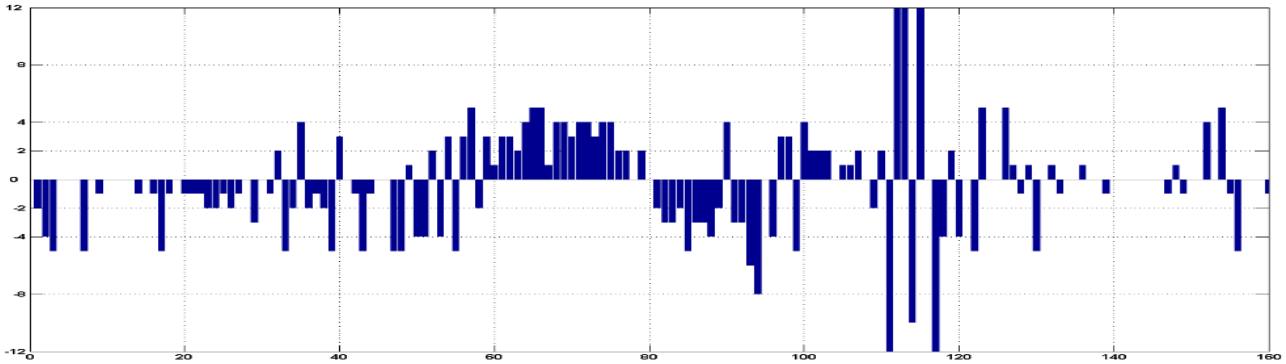
Таким образом, смещение основного репера по каждому направлению состоит из 2-х составляющих – смещения фона и смещения основного репера относительно фона, умноженного на коэффициент, представляющий собой оценку достоверности этого смещения.

Рисунок 4 иллюстрирует результаты моделирования процесса слежения по видеопоследовательности «мост». Основной репер (рисунок 4 а) обозначен крестом и представляет собой фрагмент однородного, протяжённого по горизонтали, образования. Фоновые реперы обозначены прямоугольными стробами. На рисунке 4 б) представлены межкадровые смещения на последовательности кадров основного репера в горизонтальном направлении ($\tilde{\beta}^0$), полученные без ис-

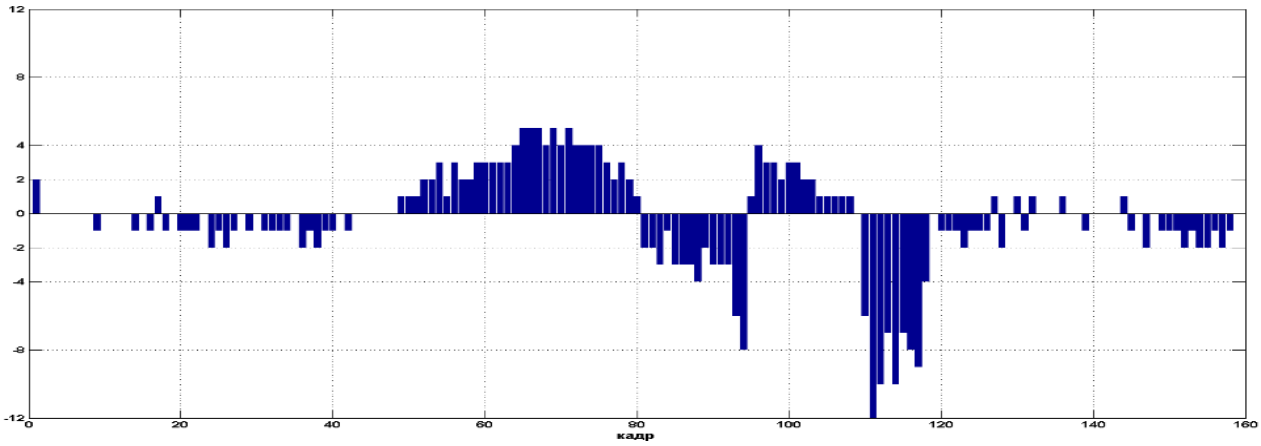
пользования фоновых реперов, а на рисунке 4 в), с использованием фоновых реперов согласно выражениям (13)÷(18).



а) кадр 160 видеопоследовательности «мост»;



б) смещение ($\tilde{\beta}^0$) основного репера в горизонтальном направлении (кадры 0 - 160) без учета смещения фона;



в) смещение (β^0) основного репера в горизонтальном направлении (кадры 0 - 160) с учетом смещения фона.

Рис. 4. Результаты слежения.

Графики показывают, что оценки смещения основного репера флюктуируют с большой амплитудой и чередованием знаков, что свидетельствует о неустойчивом слежении и возможности срыва, тогда как оценки, выполненные с использованием коррекции на основе анализа достоверности его движения относительно фоновых реперов, лишены указанных недостатков.

Оценка эффективности предложенного метода слежения выполнялась с помощью математического моделирования. В процессе моделирования использовались видеопоследовательности, полученные в ходе лётных испытаний бортовых видеоинформационных систем различного назначения. Характеристики некоторых видеопоследовательностей приведены в таблице 1.

Таблица 1.

№	Сюжет, кол-во кадров	Краткое описание видеопоследовательности
1	«ТЭЦ ТВ», 2470	- слабый контраст, сглаженные яркостные перепады; - объектом слежения - протяжённый объект без выраженных структурных особенностей; - межкадровые смещения сцены превышают зону корреляции; - увеличение масштаба и незначительные ракурсные изменения объекта
2	«ТЭЦ ИК», 721	- протяжённый объект слежения не имеет выраженных структурных особенностей; - изменение ракурса; - монотонное увеличение масштаба
3	«Аэродром», 3339	- объект слежения расположен по диагонали; - изменение ракурса; - монотонное увеличение масштаба
4	«Автомобильный мост ТВ», 5816	- значительные ракурсные изменения наблюдаемой сцены и увеличение масштаба при приближении; - протяжённый объект слежения не имеет выраженных структурных особенностей.
5	«Самолёты», 3461	- значительные изменения ракурса и масштаба; - большие межкадровые смещения; - ряд непродолжительных постепенных затемнений наблюдаемой сцены.

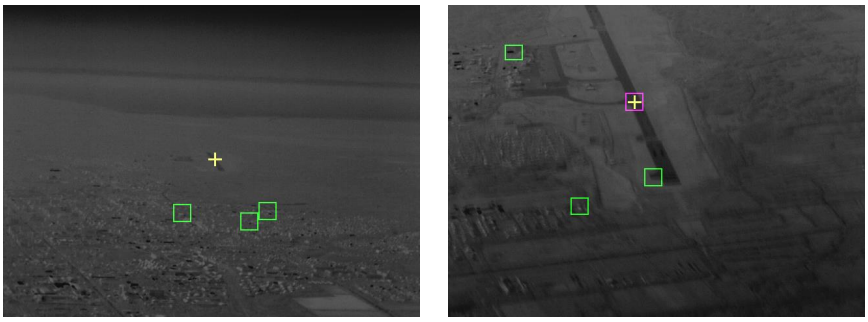
Рисунок 5 иллюстрирует начальный и последний кадры тестовых видеопоследовательностей с указанием координат объектового и фоновых реперов, а в таблице 2 представлены итоговые результаты моделирования.

Таблица 2.

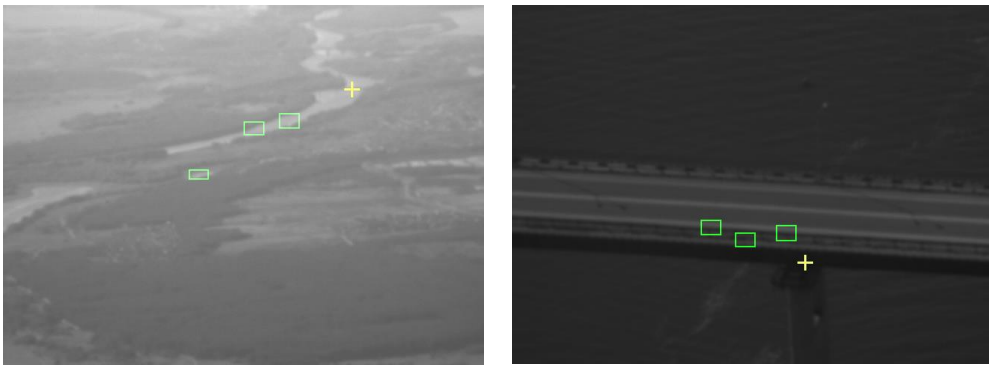
№	Сюжет	СКО, вариант без коррекции		СКО, вариант с коррекцией		Примечание
		σ_y	σ_z	σ_y	σ_z	
1	«ТЭЦ ТВ»	2.229	2.089	1.186	2.039	
2	«ТЭЦ ИК»	1.705	2.035	0.921	1.947	
3	«Аэродром»	0.774	0.658	0.431	0.392	
4	«Автомобильный мост ТВ»	0.935	1.040	0.5449	0.602	Срыв на 5795 кадре
5	«Самолёты»	2.861	2.690	2.726	2.592	Срыв на 590 кадре

«ТЭЦ ТВ»

«ТЭЦ ИК»



«Аэродром»



«Автомобильный мост ТВ»

«Самолёты»

Слева – начальный кадр последовательности, справа – конечный

Рис. 5. Результаты моделирования.

Заключение

1. Предложен метод реперного слежения, отличающийся использованием декомпозиции исходного изображения с помощью вейвлет-преобразования Хаара и формирования координатных смещений на базе объединенной корреляционной функции фоновых реперов.
2. Проведено математическое моделирование предложенного метода с использованием видеопоследовательностей, полученных в ходе лётных испытаний бортовых видеоинформационных систем различного назначения.
3. Проведенные исследования подтвердили высокую эффективность предложенного метода при слежении за протяженными объектами с однородной яркостной структурой, обеспечив уменьшение среднеквадратичной ошибки слежения в 1.5 раза по сравнению с традиционным вариантом.

Литература

1. Шахрай В.И., Андрианов Г.П., Усова Н.Г. Многорежимный автомат сопровождения объектов // Техника средств связи. Серия: Техника телевидения. Выпуск 1, 2010.
2. Шахрай В.И. Цифровая обработка изображений в системе точного висения вертолета. Цифровая обработка сигналов. Научно-технический журнал. № 2, 2011. – С. 18-22.
3. Патент РФ № 2460135. Способ автоматического определения координатных смещений объекта слежения в последовательности цифровых изображений / Травина Е.И., Каракозов Ю.А. Приоритет от 31.03.2011, бюл. № 24 от 27.08.2012 г.
4. Гонсалес Р. Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

УДК 004.72

Шулешкин А.П.
Шахрай В.И., к.т.н.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДУЛЯ ПРИЕМА-ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С КОДЕКОМ ШПС-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Авторы приводят результаты экспериментального исследования разработанных модулей для приема-передачи информации в мобильных системах по управлению летательными аппаратами.

В рамках работ, проводимых в ЗАО МНИТИ по созданию специальных мобильных систем информационного обмена, был разработан модульный комплект аппаратуры для летательных объектов. Базовым элементом комплекта являются модули приема-передачи видео (МППВ) и командной (МППК) информации [1]. В состав модуля МППВ входят 2 ячейки: КОДЕК и МОДЕМ. Внешний вид модуля МППВ представлен на рисунке 1.

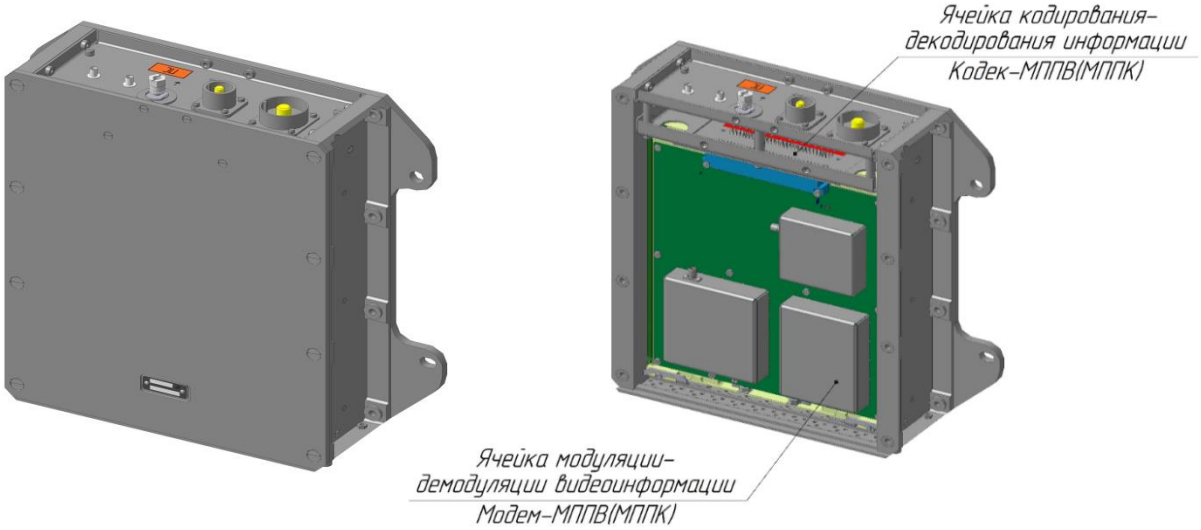


Рис. 1. Модули приема-передачи информации МППВ и МППК.

При выборе методов кодирования и модуляции было обосновано использование в аппаратуре методов фазовой модуляции с расширением спектра шумоподобными сигналами (ШПС). С учетом особенностей асинхронного приема при построении ячейки модема из состава модулей приема-передачи данных использована DQPSK-модуляция – относительная квадратурная фазовая манипуляция. Схема формирования фазоманипулированного широкополосного сигнала ФМШПС, реализованная в модуле МППВ, приведена на рисунке 2.

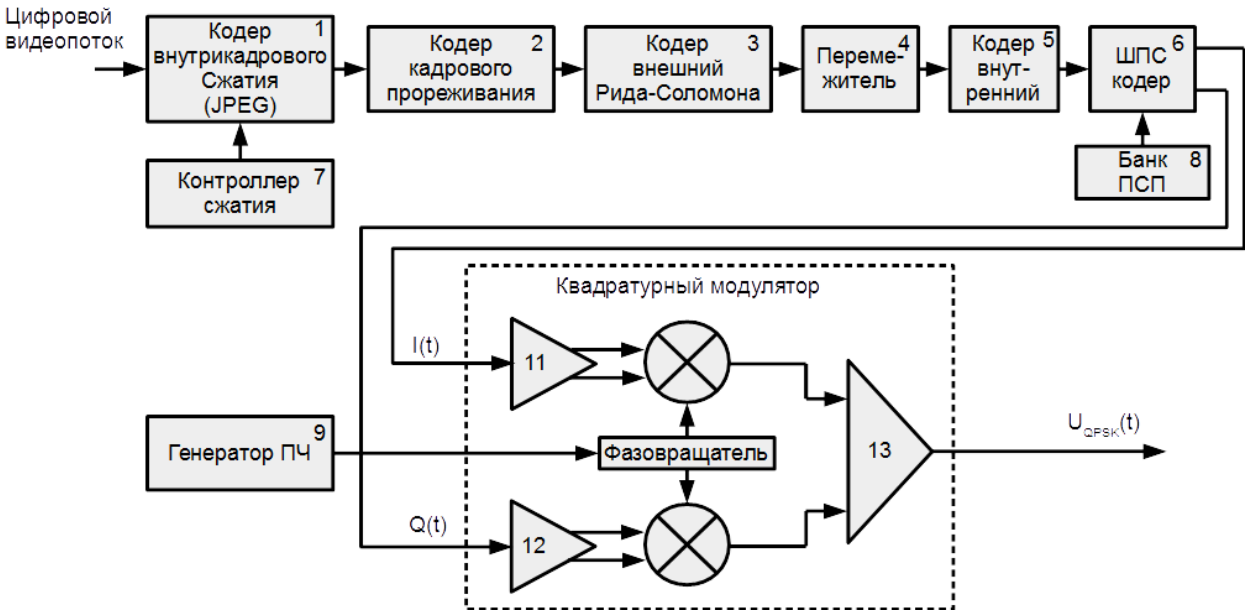


Рис. 2. Схема формирования ФМШПС в модуле МППВ.

Отметим, что квадратурная фазовая модуляция примерно на 3 дБ лучше

(с точки зрения помехоустойчивости), чем двоичная фазовая модуляция. Входная последовательность байтов, представляющая цифровой видеосигнал от видеодатчика с замешанной символьной информацией, поступает на микросхему кодера внутрикадрового сжатия 1. Кодер 1 выполняет в реальном времени сжатие видеоинформации по стандарту JPEG2000 с коэффициентом сжатия 16. Цифровой поток сжатых видеоданных поступает на вход кодера кадрового прореживания 2. В состав кодера 2 входят два банка памяти для буферирования процессов записи и считывания информации. В зависимости от выбранного коэффициента кадрового прореживания определяется тактовая частота считывания сжатой видеоинформации, которая поступает на каскадный кодер помехоустойчивого кодирования, выполненный на внешнем кодере Рида Соломона 3, перемежителе 4 и внутреннем сверточном кодере 5.

С выхода сверточного кодера 5 байтовая последовательность поступает на ШПС-кодер 6. ШПС кодер обеспечивает формирование широкополосного сигнала с базой B=64. При формировании широкополосного сигнала используется банк псевдослучайных последовательностей 8. В ШПС кодере 6 выполняется ШПС преобразование в синфазной и квадратурной цепях. С выхода ШПС кодера сформированные квадратурные сигналы *I(t)* и *Q(t)* поступают на квадратурный модулятор, где формируется выходной фазоманипулированный сигнал «ПЧ» в формате ОФМ4 (DQPSK) на промежуточной частоте 450 МГц.

Квадратурный модулятор в синфазной и квадратурной входных цепях содержит формирующие фильтры низкой частоты 11,12, необходимые для сглаживания импульсов модулирующего сигнала перед непосредственной модуляцией несущей. Для минимизации межсимвольных искажений используются формирующие фильтры со специальными импульсными характеристиками, которые обеспечивают контролируемый уровень межсимвольных искажений. Одним из таких фильтров является фильтр Гаусса с импульсной характеристикой:

$$h(t) = B\sqrt{\frac{2\pi}{\ln 2}}e^{-\frac{(Bt\pi)^2}{\ln 2}}$$

где B – полоса пропускания по уровню 3 дБ.

Сигнал $U_{DQPSK}(t)$ на выходе модулятора описывается выражением:

$$U_{DQPSK}(t) = I(t)\cos(\omega_0 t + \varphi_0) - Q(t)\sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1)$$

Синфазная *I(t)* и квадратурная *Q(t)* составляющие являются действительной и мнимой частями комплексной огибающей DQPSK *z(t):*

$$z(t) = I(t) + jQ(t) \quad (2)$$

При фазовой манипуляции фаза несущего колебания меняется скачкообразно в соответствии с таблицей 1, что поясняется векторной диаграммой на рисунке 3.

Таблица 1.

Комбинация бит		Номер символа	Начальная фаза	Комплексная огибающая
старший	младший			
0	0	0	0°+φ_0	$e^{j\varphi_0}$
0	1	1	90°+φ_0	$e^{j\frac{\pi}{2}}e^{j\varphi_0}$
1	0	2	180°+φ_0	$e^{j\pi}e^{j\varphi_0}$
1	1	3	270°+φ_0	$e^{j\frac{3\pi}{2}}e^{j\varphi_0}$

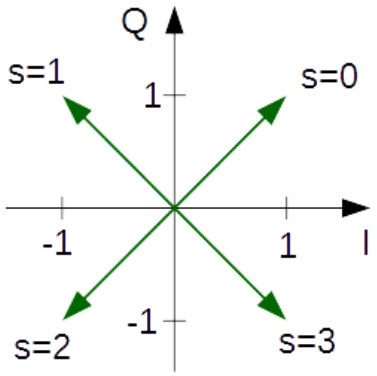


Рис. 3. Векторная диаграмма ФМШПС сигнала модулятора.

На рисунке 4 представлена функциональная схема приемного канала видеоданных, реализованная в модуле МППВ. С выхода демодулятора квадратурные последовательности «ШПС I» и «ШПС Q» подаются на аналого-цифровые преобразователи. Цифровые значения квадратурных сигналов «ШПС I» и «ШПС Q» с выхода платы АЦП поступают на ПЛИС, на которой реализован декодер ШПС.

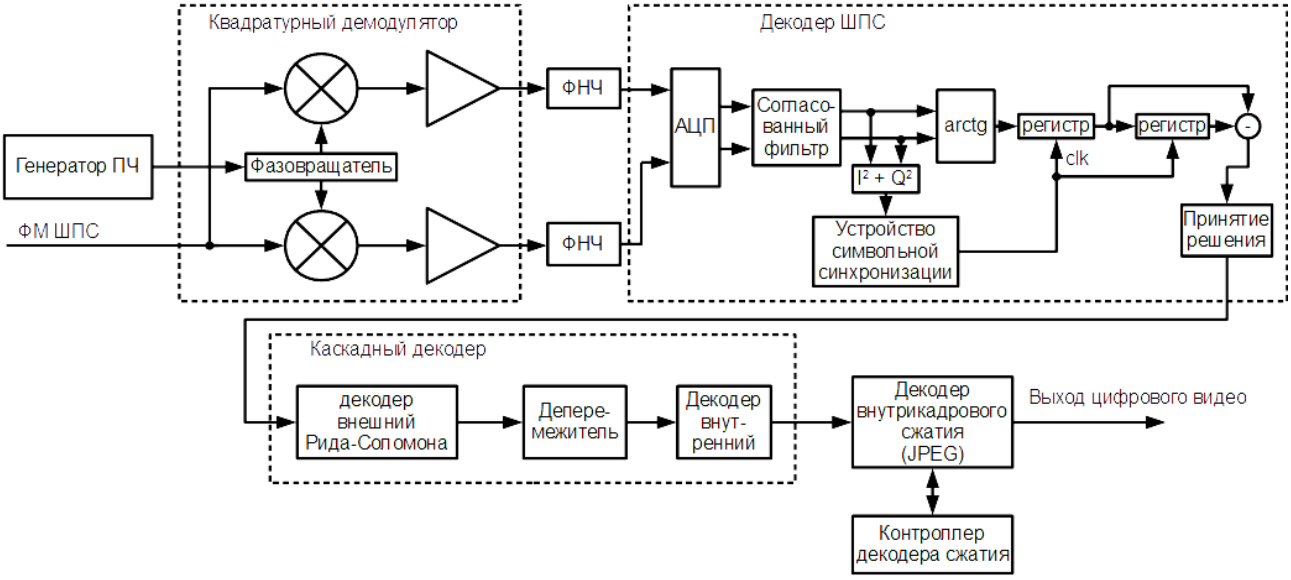


Рис. 4. Схема приемного канала видеоданных модуля МППВ.

Согласованный фильтр осуществляет вычисление корреляции комплексной огибающей принятого сигнала и комплексной огибающей расширяющей последовательности. Устройство формирования стробирующих импульсов осуществляет символьную синхронизацию. Значения фазы, полученные с помощью таблицы арктангенса, в момент максимального отношения сигнал/шум записываются в регистр.

Сигнал на выходе фильтра, согласованного с расширяющей последовательностью, длиной N=64, при отсутствии шума на входе демодулятора, приведен на рисунке 5.

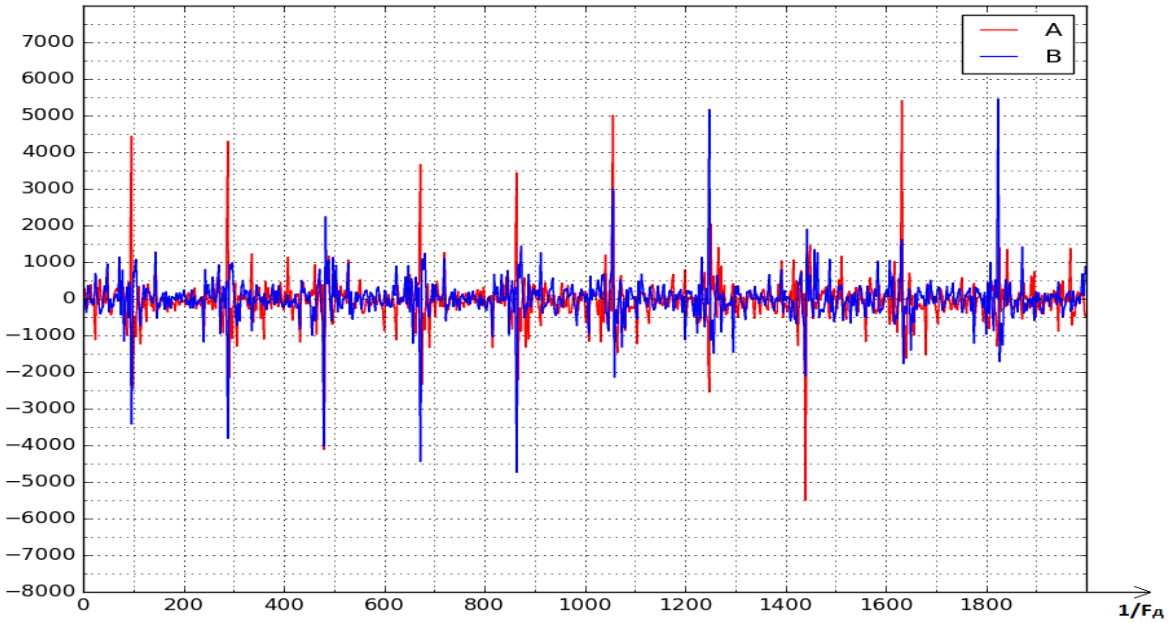


Рис. 5. Сигнал на выходе согласованного фильтра.

Устройство символьной синхронизации формирует импульсы, соответствующие максимальным значениям сигнала на выходе согласованного фильтра. Это устройство может быть простым компаратором для высоких отношений сигнал/шум. Для низких отношений сигнал/шум можно использовать ФАПЧ или накопление задержанных на длительность ПСП отсчетов сигнала с выхода согласованного фильтра. Однако реализация ФАПЧ потребует усложнения схемы, а накопление отсчетов потребует относительно много ресурсов ПЛИС, поэтому было разработано простое устройство, блок-схема которого приведена на рисунке 6.

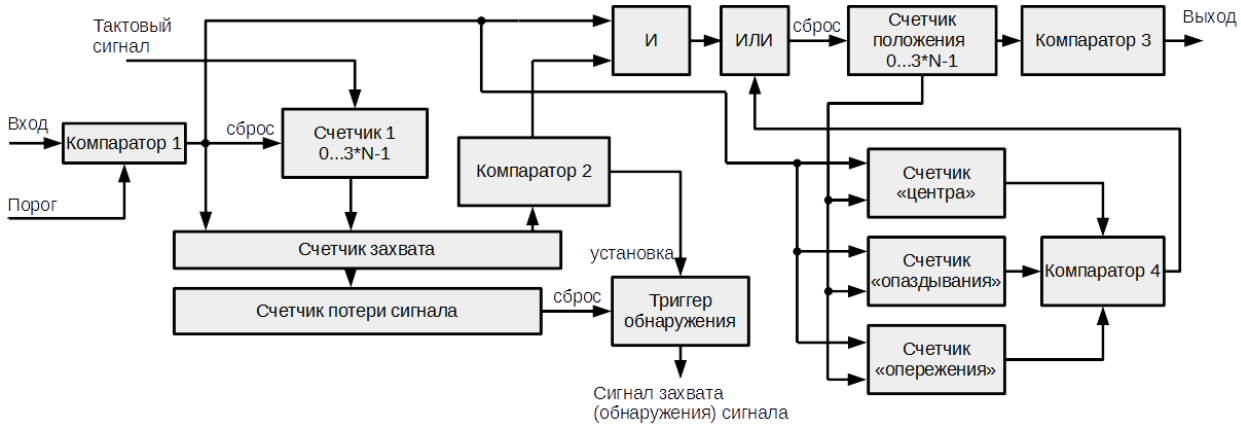


Рис. 6. Устройство формирования импульсов символьной синхронизации.

Счетчик 1 инкрементируется по фронту тактового сигнала и сбрасывается при превышении входным сигналом заданного порога. Счетчик захвата инкрементируется, когда входной сигнал выше порога и счетчик 1 достиг до своего максимального значения, равного периоду повторения ШПС, и сбрасывается, когда входной сигнал выше порога, но счетчик 1 не достиг своего максимального значения. Таким образом, если с выхода компаратора 1 пришло заданное в компараторе 2 количество импульсов с периодом, равным периоду повторения ШПС, триггер обнаружения устанавливается в состояние лог. “1” и выдается сигнал захвата (обнаружения) сигнала. Счетчик потери сигнала сбрасывает триггер обнаружения при длительном отсутствии сигнала с счетчика захвата.

Счетчик положения, с периодом равным периоду повторения ШПС, инкрементируется по фронту тактового сигнала и сбрасывается при условии: входной сигнал больше порога и значение счетчика захвата больше порога компаратора 2 или значение одного из счетчиков “центра”, “опаздывания” или “опережения” больше порога компаратора 4.

Счетчики “центра”, “опережения” и “опаздывания” инкрементируются при превышении входным сигналом порога и максимальном для счетчика “центра”, нулевом для счетчика “опережения” и максимальном – 1 для счетчика “опаздывания” значении счетчика положения.

Компаратор 3 выдает лог. “1” при совпадении значения счетчика положения с заданным значением, изменяя которое можно менять положение стробирующего импульса относительно моментов максимального отношения сигнал/шум.

Результаты экспериментальной проверки

Работоспособность устройства формирования стробирующих импульсов сохраняется при снижении отношения сигнал/шум до -12,5 дБ.

Сигнал на выходе согласованного фильтра при отношении сигнал/шум -12 дБ на входе демодулятора приведен на рисунках 7 и 8 приведена сумма квадратов сигналов с выхода согласованного фильтра.

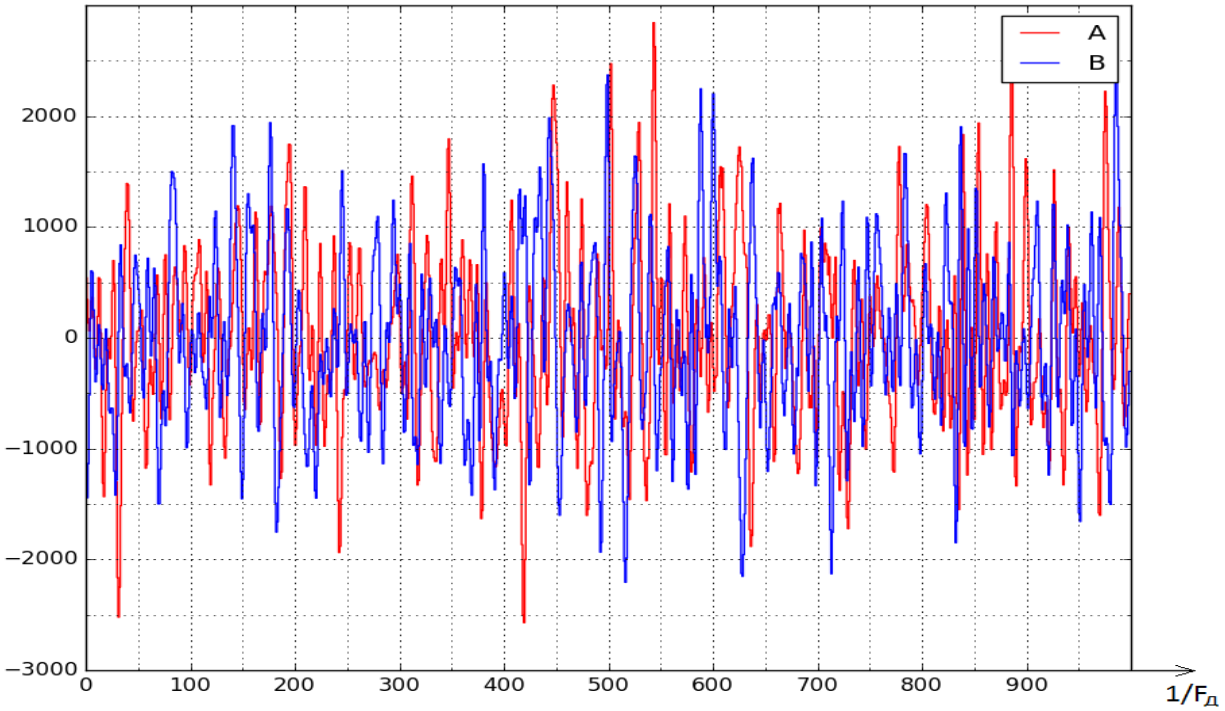


Рис. 7. Комплексный сигнал на выходе согласованного фильтра.

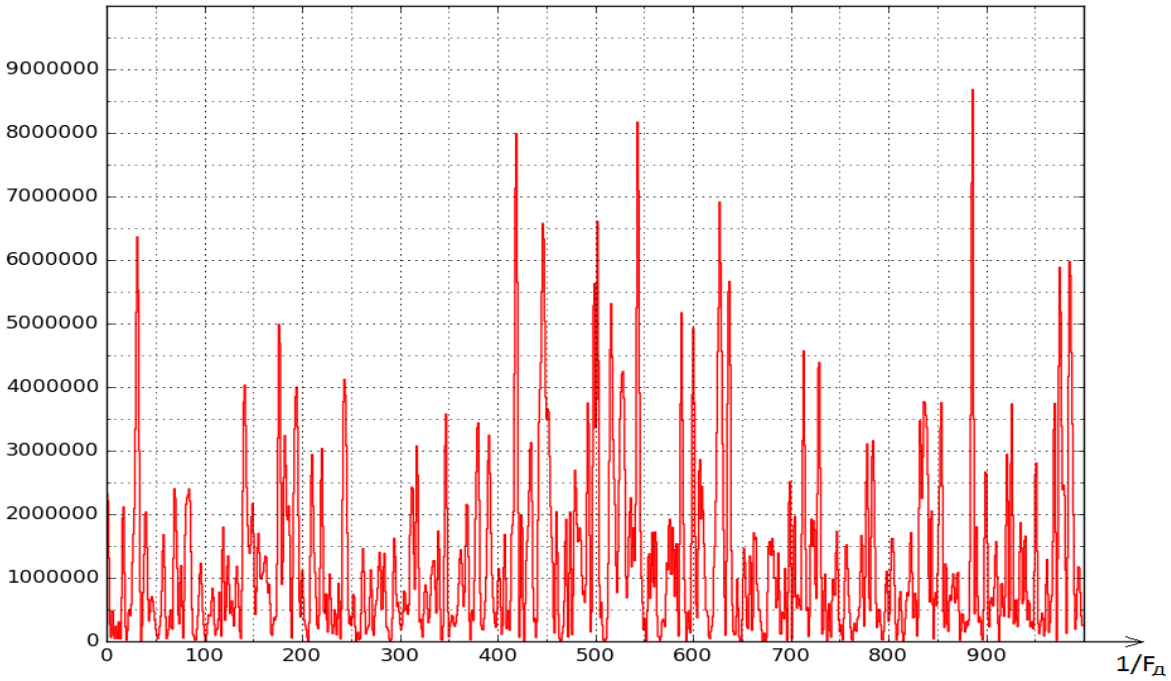


Рис. 8. Квадрат модуля комплексного сигнала с выхода согласованного фильтра.

Вероятности битовой ошибки $P_{бит}$ при различных отношениях сигнал/шум $SNR = \frac{P_c}{Pш}$, где P_c – мощность сигнала, $P_ш$ – мощность шума, приведены на графике рисунке 9.

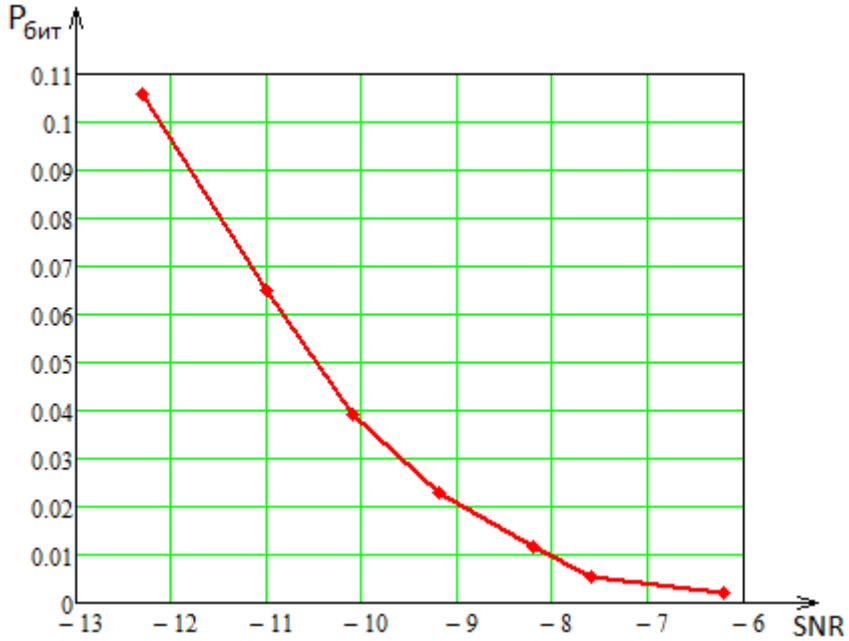


Рис. 9. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум.

Результаты экспериментальной проверки показали, что созданный канал мобильной связи, обеспечивает уверенный прием видеоинформации при отно-

шении сигнал/шум -12 дБ на входе демодулятора. При этом допустимое отношение сигнал/шум отличается от теоретического предела не более чем на 1,5 дБ [3].

Литература

1. Шахрай В.И., Перегонов С.А., Лисицын А.А., Никитин С.В. Особенности построения аппаратуры передачи данных трансляционно-командных систем наведения подвижных объектов // Электронная техника. Серия: СВЧ-техника. Выпуск 3 (526), 2015 г. – С. 4-10.
2. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа, 1998.
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. : Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003.

УДК 004.932.1+004.272.43

Королев Д.Е., к.т.н.
Соколов И.С.

РАЗРАБОТКА MJPEG-КОДЕРА НА БАЗЕ МИКРОПРОЦЕССОРА 1892ВМ10Я

Проведено исследование варианта построения MJPEG-кодера на базе отечественного микропроцессора 1892ВМ10Я и приведены описание и структура его работы. Для разработки и тестирования работы MJPEG-кодера создан испытательный стенд и разработано специальное программное обеспечение. Приведена таблица времени затраченного на этапы обработки одного кадра на МП 1892ВМ10Я. Также приведена таблица для сравнительной оценки работы DSP-ядра ELcore-30M и универсального ядра типа Cortex-A9 (ARM) МП 1892ВМ14Я.

Введение

На сегодняшний день в специальной аппаратуре широко применяются современные алгоритмы обработки изображений, и в частности алгоритмы сжатия. В разработке трансляционно-командной системы наведения (ТКСН) применяется сжатие изображений по алгоритму MJPEG. Для аппаратного JPEG-сжатия существуют специализированные интегральные микросхемы (ИМС), например, микросхема ADV212 фирмы Analog Devices и IP-ядра для ПЛИС фирм Altera (семейства Cyclone) и Xilinx (семейства Spartan). Основным недостатком этих вариантов, при использовании в специализированной аппаратуре, является применение импортных электронных радиоизделий (ЭРИ). Отечественные специализированные ИМС и ПЛИС необходимого уровня, на сегодняшний день, отсутствуют. Таким образом, реализация JPEG-сжатия на отечественной элементной базе является актуальной задачей.

Одним из наиболее оптимальных вариантов построения JPEG-кодера может быть использование отечественных процессоров цифровой обработки сигналов, в частности микропроцессора (МП) 1892ВМ10Я, разработанного компанией ЗАО «НПЦ Элвис». МП 1892ВМ10Я является одним из наиболее производительных отечественных процессоров в сегменте микросхем, применяемых в специальной встраиваемой аппаратуре. Трехядерный МП 1892ВМ10Я (одно RISC ядро и два DSP ядра) изготовлен по технологии КМОП с топологическими размерами элементов 0,13 мкм. Производительность DSP-кластера (2 ядра) в формате плавающей точки (стандарт IEEE754) составляет 4000 MFLOPs, что соответствует 16 операциям с плавающей точкой (IEEE 754) за 1 такт. Для разработки и тестирование работы MJPEG кодера на базе МП 1892ВМ10Я в ЗАО «МНИТИ» был создан испытательный стенд кодера JPEG (ИСК-JPEG).

Функциональная схема MJPEG-кодера

Макетирование и проверка работы MJPEG-кодера проводилась на ИСК-JPEG, основой которого является отладочный модуль NVCom-02TEM-3U. В состав стенда вошли следующие элементы:

1. Отладочный модуль NVCom-02TEM-3U на базе МП 1892ВМ10Я.
2. Генератор тестовой видеопоследовательности.
3. Эмулятор MC-USB-JTAG.
4. ПК с установленным специальным программным обеспечением (СПО), для контроля работы ИСК-JPEG.

Внешний вид ИСК-JPEG показан на рисунке 1.

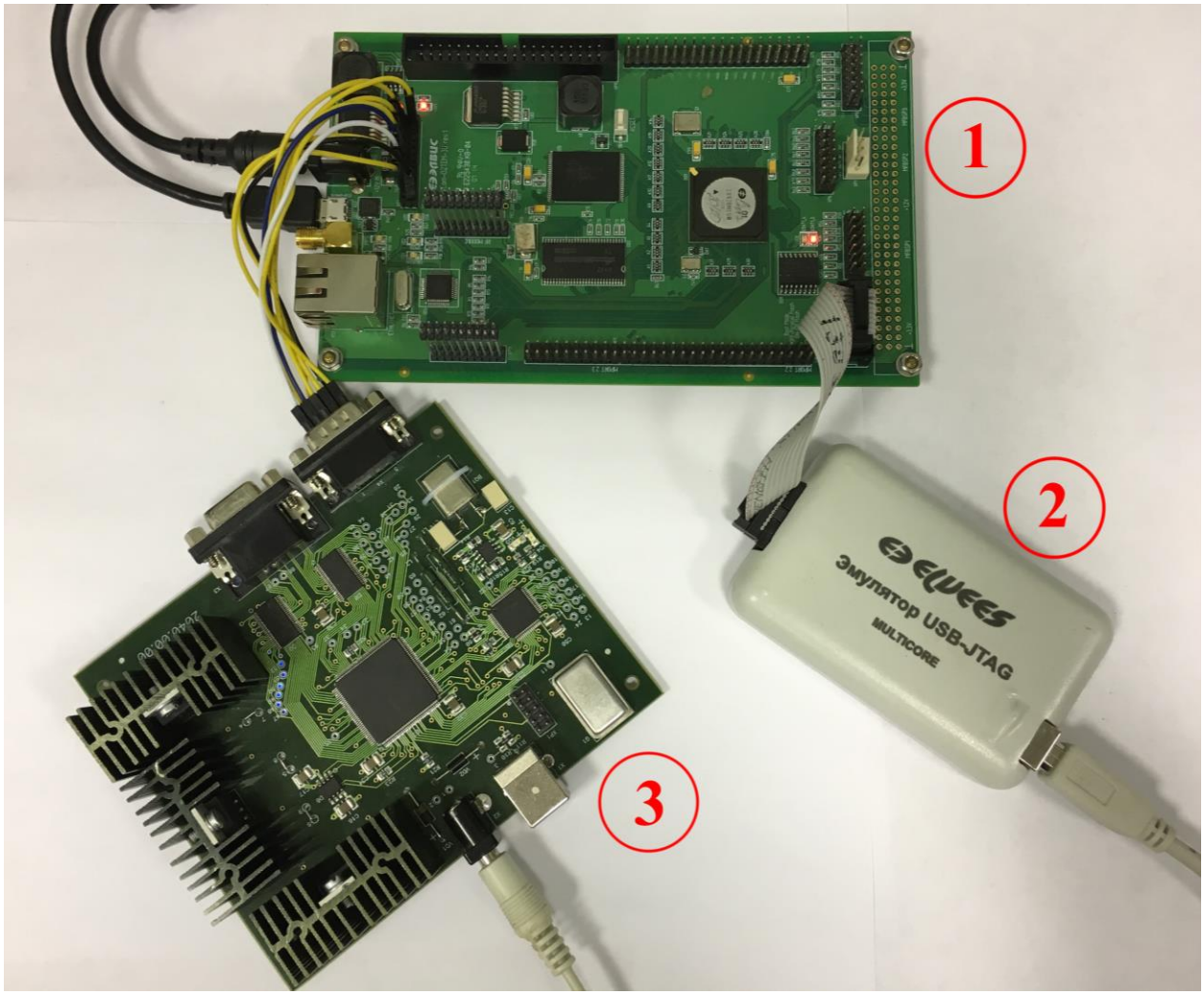


Рис. 1. Внешний вид ИСК-JPEG.

С генератора тестовой видеопоследовательности на порт ввода видеоданных VPIN отладочного модуля NVCom-02TEM-3U (рисунок 2) поступает входная монохромная видеопоследовательность с частотой 30 кадров в секунду.

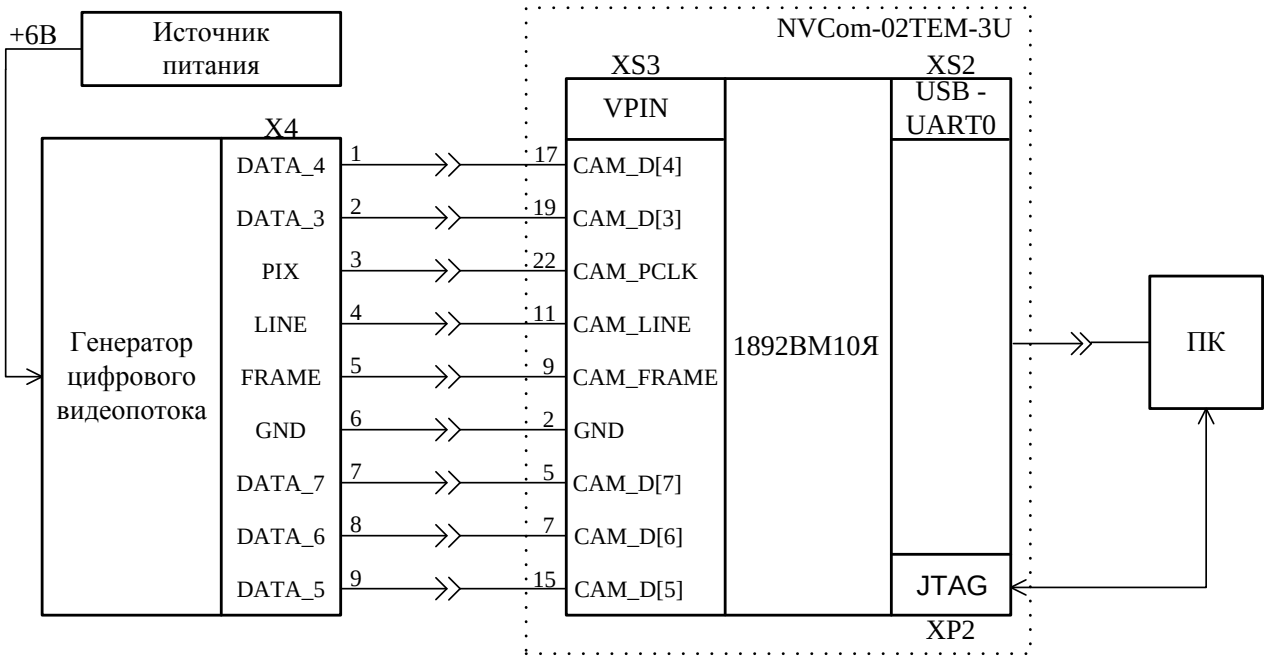


Рис. 2. Схема соединений ИСК-JPEG.

В RISC-ядре МП 1892ВМ10Я кадр записывается с помощью DMA-контроллера порта VPIN в ОЗУ. После чего DMA-контроллер порта VPIN переводится в режим ожидания. При получении полного кадра, происходит перекодирование яркостных данных (1 байт на пиксель) в RGB-модель (3 байта на пиксель). Далее запускается процесс кодирования, полученного RGB-изображения в JPEG-формат с использованием алгоритма Хаффмана. JPEG-кодирование производится в DSP ядре МП 1892ВМ10Я, обмен данными между RISC и DSP-ядрами производиться контроллером DMA ОЗУ. DSP-ядро обрабатывает блоки 16x16 пикселей (по 768 байт).

Полученное JPEG-изображение записывается в буфер и передается по универсальному асинхронному порту UART в виртуальный порт USB на ПК (рисунок 3).

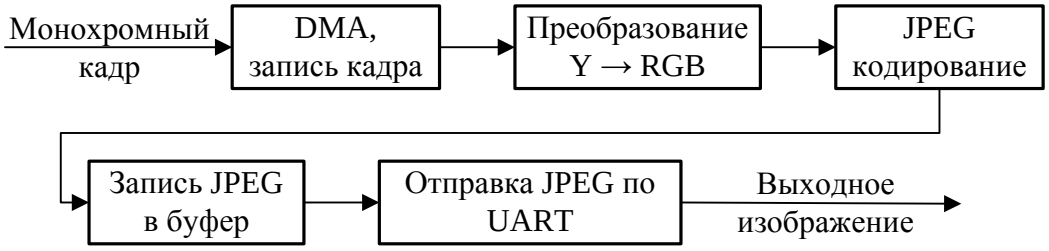


Рис. 3. Схема работы MJPEG-кодера.

Рабочая программа JPEG-кодирования написана на языке ассемблера для DSP-ядра ELcore-30M и составляет 1795 строк кода.

JPEG кодирование состоит из следующих этапов (рисунок 4).

1. Создание заголовка файла формата JPEG;
2. Преобразование цветовой модели RGB в трехкомпонентное цветовое пространство YCbCr (хранится в файле формата JPEG);
3. Дискретно-косинусное преобразование;
4. Квантование;
5. Размещение квантованных данных в зигзагообразный порядок;
6. Кодирование Хаффмана;
7. Запись закодированных данных в память буфера.

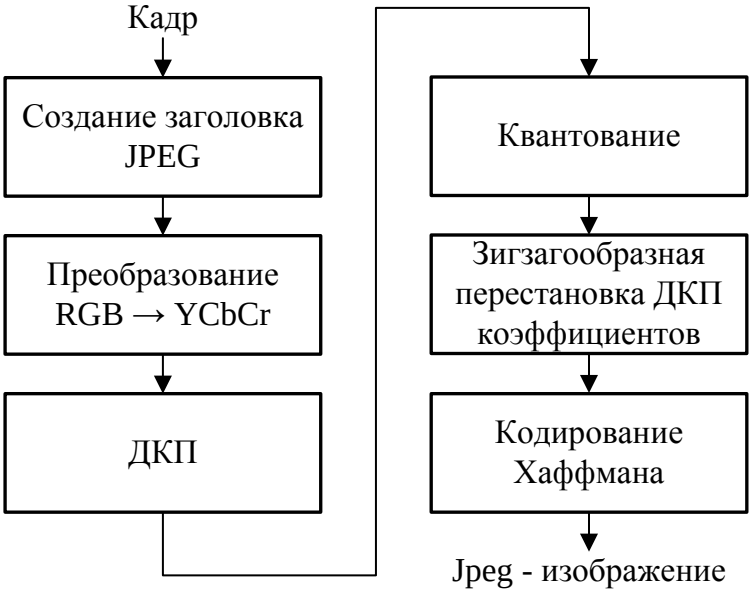


Рис. 4. Алгоритм кодирования JPEG.

Коэффициент сжатия зависит от исходного изображения и составляет от 14 (реальное изображение) до 55 (синтезированное изображение) раз.

Проверка функционирования MJPEG-кодера

Контроль работы МП 1892ВМ10Я, проводился с помощью JTAG-эмулятора MC-USB-JTAG и среды разработки и отладки программ MCStudio3M NVCom02T.

Измерение времени, затрачиваемого на кодирование одного кадра, определялось из среды MCStudio3M NVCom02T по значению регистра подсчета тактов (регистр Count) ядра MIPS32. 32-х разрядный регистр Count выполняет

подсчет числа тактов, в течение которых ядро находилось в состоянии RUN.

Расчет времени:

$$T = \frac{countTacts}{f},$$

где countTacts – количество тактов; f – тактовая частота.

Также для отображения результатов работы MJPEG-кодера и проверки его функционирования было разработано специальное программное обеспечение. Рабочее окно СПО показано на рисунке 5 и обладает следующими функциями:

- прием изображений по виртуальному последовательному порту в форматах JPEG или JPEG-2000, декодирование полученных изображений и их вывод на экран ПК;
- вывод значений пикселей изображения в hex-формате отдельного окна;
- вывод свойств принимаемого последовательности изображений (количество принятых изображений, количество принимаемых кадров в секунду, высоту и ширину, размер в байтах, как отдельного кадра, так и всех кадров в сумме).

В СПО, для отображения результатов работы MJPEG-кодера, происходит считывание полученных по порту USB данных, декомпрессия и вывод изображения на экран ПК, с фиксацией разрешения изображения, размера в байтах и количества получаемых кадров в секунду.

Время, затрачиваемое кодером на базе МП 1892ВМ10Я, по этапам обработки одного кадра приведено в таблице 1. Коэффициент сжатия указан относительно монохромного изображения (один байт на пиксель).

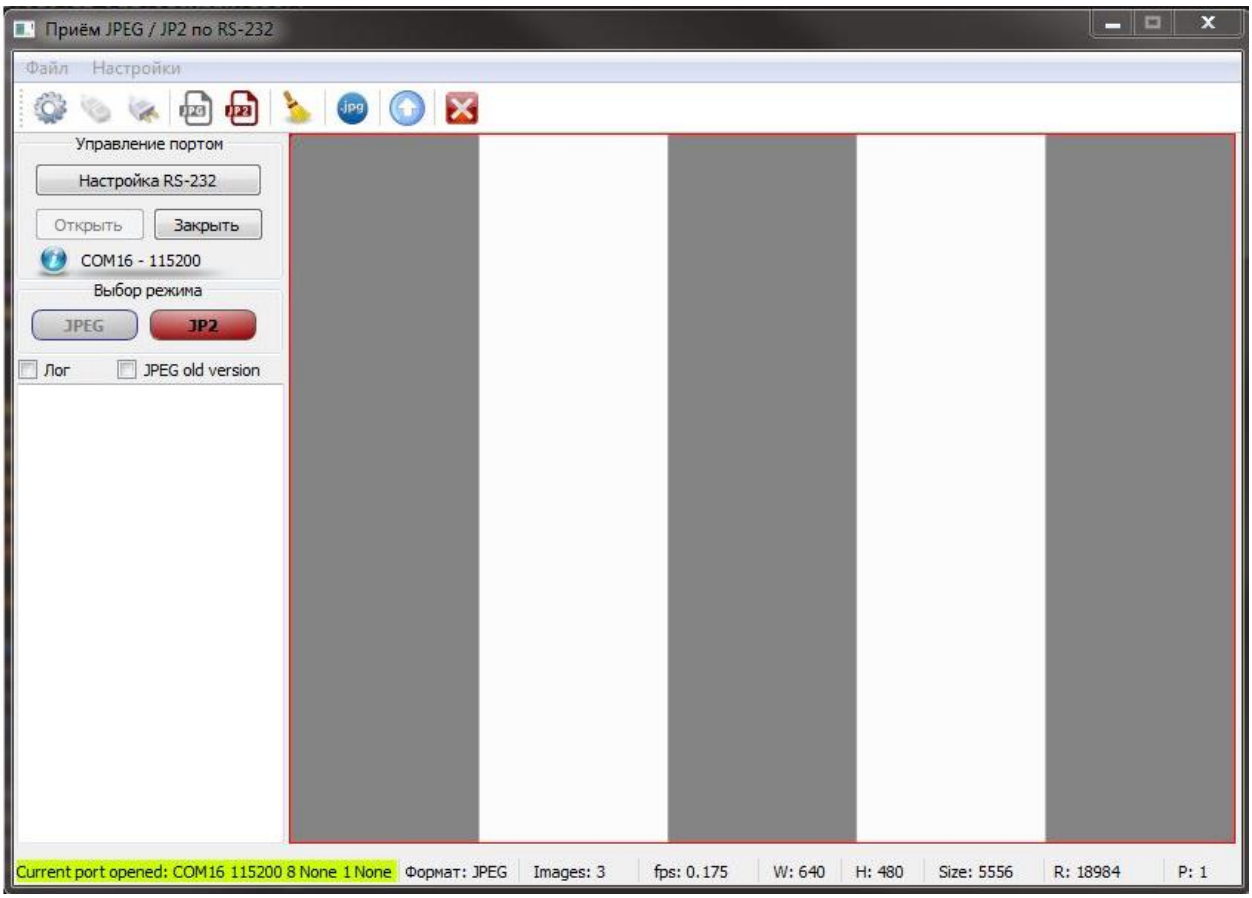


Рис. 5. Внешний вид контрольной программы.

Рис. 6. Изображение разрешением 640x480.

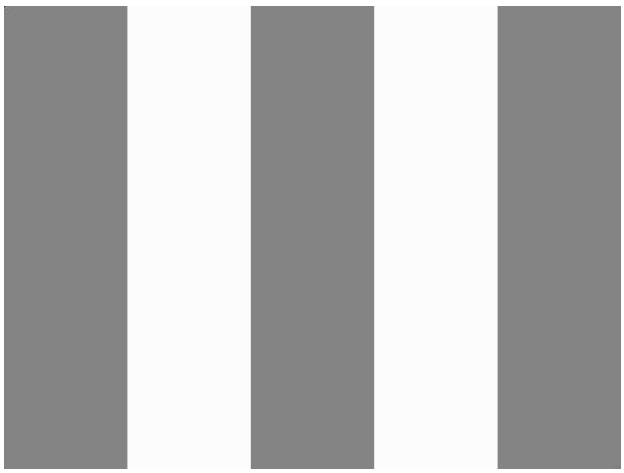


Рис. 7. Синтезированное изображение, выдаваемое генератором тестового видеопотока. Разрешение 640x480.

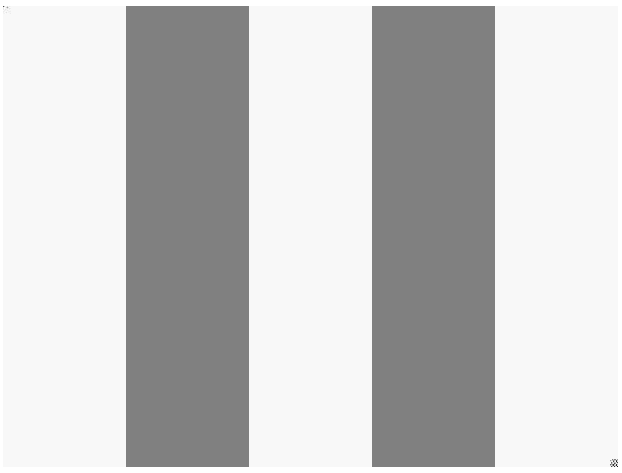


Рис. 8. Синтезированное изображение, выдаваемое генератором тестового видеопотока. Разрешение 640x480.

Таблица 1. Оценка времени работы MJPEG-кодера.

№ п/п	Этап обработки	Тип ядра	Тактовая частота ядра, МГц	Коэффициент сжатия относительно исходного изображения, раз	Время, мс
1	Y → RGB	MIPS32 (RISC)	240	—	831,5
2	JPEG-сжатие (рисунок 7)	Элвис DELcore-30M (DSP)	240	55	90,1
3	JPEG-сжатие (рисунок 8)	Элвис DELcore-30M (DSP)	240	55	90,1
4	JPEG сжатие (рисунок 6)	Элвис DELcore-30M (DSP)	240	14	95,4
5	Передача по UART, 115200 бит/с (рисунки 7, 8)	MIPS32 (RISC)	240	—	~ 481
6	Передача по UART, 115200 бит/с (рисунок 6)	MIPS32 (RISC)	240	—	1851
7	Передача по UART, 921600 бит/с (рисунки 7, 8)	MIPS32 (RISC)	240	—	~ 71
8	Передача по UART, 921600 бит/с (рисунок 6)	MIPS32 (RISC)	240	—	273

Для сравнительной оценки работы DSP-ядра ELcore-30M в таблице 2 при-

ведено время декодирования изображения (рисунок 6) выполненного на универсальном ядре типа Cortex-A9 (ARM) микропроцессора 1892ВМ14Я. Декодирование выполнялось с помощью библиотеки Jasper (кодек JPEG-2000) на ОС Archlinux.

Таблица 2. JPEG-декодирование изображения микропроцессором 1892ВМ14Я.

№ п/п	Этап обработки	Тип ядра	Тактовая частота ядра, МГц	Коэффициент сжатия, раз	Время, мс
1	JPEG сжатие (рисунок 6)	Cortex-A9 (ARM)	816	30	80,5
2	JPEG декодирование (рисунок 6)	Cortex-A9 (ARM)	816	—	110,7

Заключение

На сегодняшний день МП 1892ВМ10Я является одним из наиболее производительных отечественных процессоров в сегменте микросхем применяемых в специальной встраиваемой аппаратуре.

В ходе тестирования на испытательном стенде показана возможность использования МП 1892ВМ10Я для задач сжатия изображений, в частности MJPEG-кодирования.

Время JPEG-сжатия кадра при работе одного DSP-ядра составляет около 90-95 мс., что должно обеспечить сжатие около 10 кадров в секунду. Вместе с тем испытания показали, что наибольшее время при обработке кадра занимает преобразование из яркостного формата в RGB-изображение и передача JPEG-кадра в ПК по USB-порту (виртуальный UART). Преобразование кадра из яркостного формата в RGB-изображение целесообразно реализовывать на ПЛИС или при работе с монохромным изображением необходимо модифицировать алгоритм сжатия соответствующим образом.

Литература

1. ОАО НПЦ «ЭЛВИС». Микросхема интегральная 1892ВМ10Я. Руководство пользователя. РАЯЖ.431282.012Д17.
2. ОАО НПЦ «ЭЛВИС». DSP-ядро ELCORE-30M. Система инструкций. РАЯЖ.00150-01 93 01-1.

3. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. – М.: Диалог-МИФИ, 2003.
4. Вернер М. Основы кодирования. Учебник для ВУЗов. – М.: Техносфера, 2004. – 288 с.

УДК 535.315

Алимов А. Е., к.т.н.
Шавкунов О. В.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЦВЕТОДЕЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СО СВЕТОСИЛЬНЫМИ ОБЪЕКТИВАМИ

Представлен метод расчета оптимальных конструктивных параметров цветоделительной системы в телевизионных камерах, что позволяет разрабатывать подобные системы для конкретных типов объективов.

Введение

В настоящее время в прикладном телевидении широкое применение получили телевизионные камеры, в которых формирование цветного изображения происходит при помощи нескольких оптических каналов, в каждом из которых имеется приемник излучения, регистрирующий определенную часть спектра. Это позволяет повысить светочувствительность, разрешающую способность и избавиться от негативных эффектов, связанных с применением фильтра Байера. Также появляется возможность идентификации объектов не только по геометрической форме, но и по их спектральным сигнатурам.

Такие телевизионные камеры, как правило, состоят из объектива, общего для всех каналов, и цветоделительной системы. Данная компоновка камеры позволяет получать для каждого канала геометрически идентичные изображения, регистрируемой сцены (т.е. свободные от эффекта параллакса), но различающиеся по спектральному составу.

В данной работе представлен метод расчета оптимальных конструктивных параметров цветоделительной системы, обеспечивающей выделение трех спек-

тральных каналов и предназначенной для работы совместно со светосильным объективом.

Выбор типа цветоделительной системы

Цветоделительные системы могут быть построены как на основе дихроичных зеркал, так и на основе оптических призм. При этом призменные цветоделительные системы имеют ряд преимуществ над зеркальными, которые подробно описаны в [1, 2].

Рассмотрим одно из преимуществ, которое будет иметь решающее значение при выборе типа цветоделительной системы для использования совместно со светосильными объективами, которые характеризуются высокими значениями задних апертурных углов. Известно, что эффективность работы цветоделительного покрытия, представляющего собой многослойный интерференционный фильтр, зависит от угла падения на него пучка излучения. При увеличении угла падения происходит смещение экстремумов пропускания в коротковолновую часть спектра и деформация спектральной кривой. Кроме того, при больших углах падения максимумы пропускания для света с различными состояниями поляризации не совпадают [3]. Поэтому, для обеспечения качественного разделения излучения по спектральным диапазонам в рассматриваемом классе оптических систем, необходимо обеспечить минимальный диапазон углов падения лучей на цветоделительные покрытия. Добиться этого можно благодаря применению призменных цветоделительных систем, которые позволяют сузить диапазон углов падения лучей по сравнению с системами на основе дихроичных зеркал. Например, использование объектива с выходным апертурным углом равным 34° совместно с призменной системой из материала с показателем преломления 1,5 позволяет уменьшить диапазон углов падения лучей на цветоделительные покрытия до 22,5° (при использовании зеркальной системы он останется равным 34°).

К настоящему времени разработано множество конструкций призменных цветоделительных систем [4, 5, 6]. В настоящей работе ограничимся рассмотрением системы, включающей в себя три призмы с двумя цветоделительными покрытиями. Она имеет минимальное количество оптических элементов необходимых для выделения трех спектральных каналов, что делает ее более технологичной в изготовлении и юстировке по сравнению с системами, состоящими из 4-х и более призм.

Расчет конструктивных параметров призменной системы

Рассмотрим цветоделительную систему (рисунок 1), которая обеспечивает формирование изображения размером $2y'$ на расстоянии $s'_{F'}$ от выходной грани призмы в трех спектральных диапазонах: ($\lambda_1 - \lambda_2$), ($\lambda_3 - \lambda_4$), ($\lambda_5 - \lambda_6$), при этом $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3 < \lambda_4 < \lambda_5 < \lambda_6$. Примем, что первое цветоделительное покрытие (ЦП1) отражает излучение в диапазоне ($\lambda_1 - \lambda_2$) и пропускает в диапазоне ($\lambda_3 - \lambda_4$), ($\lambda_5 - \lambda_6$), а второе цветоделительное покрытие (ЦП2) отражает в диапазоне ($\lambda_5 - \lambda_6$) и пропускает в диапазоне ($\lambda_3 - \lambda_4$). Сформированный объективом поток излучения, падающий на призменную систему, имеет предельный выходной апертурный угол σ' и максимальный полевой угол ω'.

При расчете конструктивных параметров такой призменной системы требуется обеспечить выполнение следующих условий:

1) излучение, отраженное от цветоделительного покрытия на задней грани первой призмы, должно падать на переднюю грань первой призмы под углом большим, чем предельный угол полного внутреннего отражения (ПВО);

2) излучение, проходящее во вторую призму, должно падать на заднюю грань первой призмы под углом меньшим, чем предельный угол полного внутреннего отражения ПВО;

3) излучение, отраженное от задней грани второй призмы, должно падать на переднюю грань второй призмы под углом большим, чем предельный угол ПВО;

4) световые размеры элементов призменной системы должны обеспечивать прохождение излучения без внесения дополнительного виньетирования;

5) габариты призмы должны соответствовать заднему фокальному отрезку объектива и обеспечивать требуемый задний фокальный отрезок системы объектив – призменная цветоделительная система.

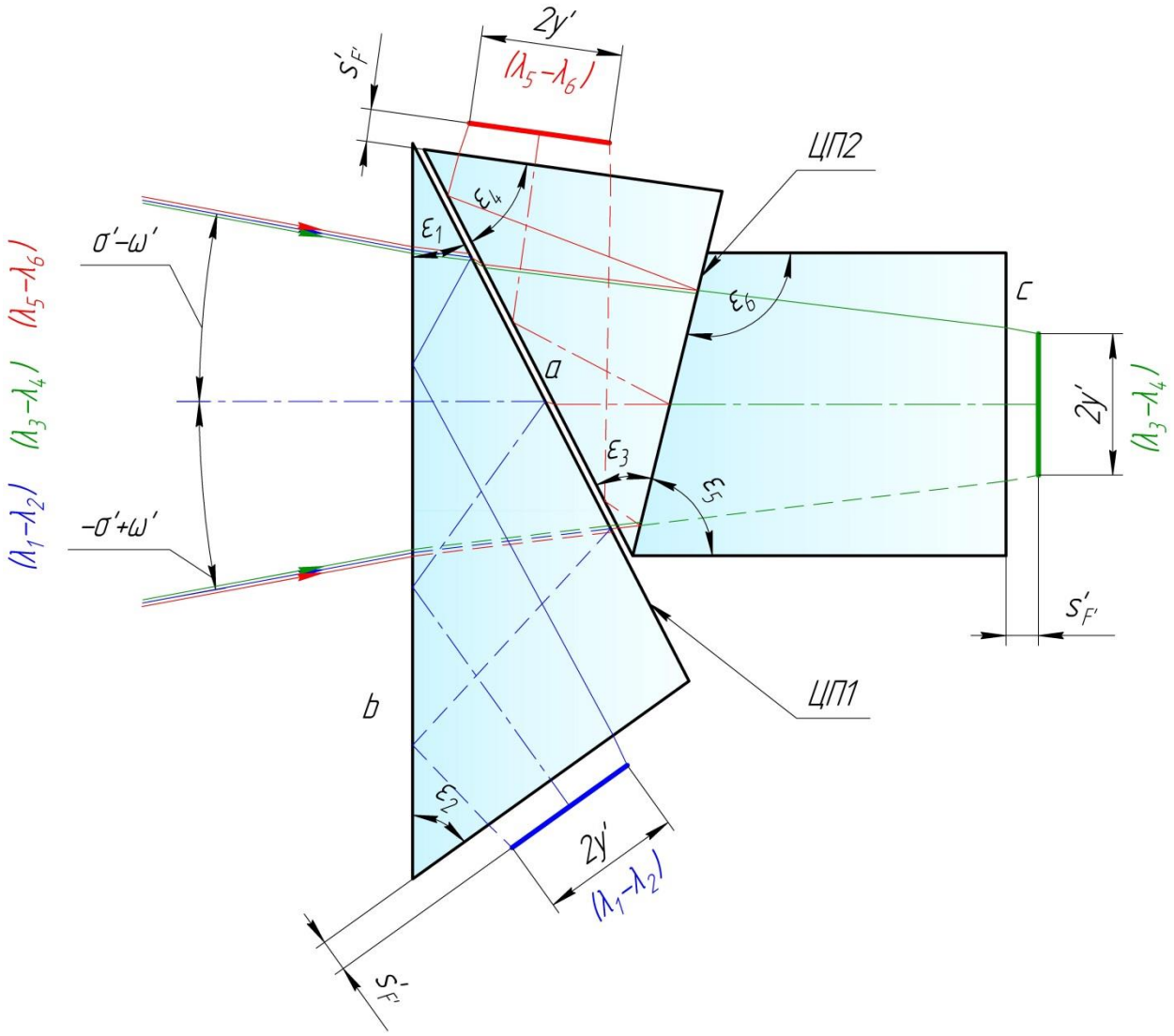


Рис. 1. Исходные данные для расчета конструктивных параметров призменной системы.

Отметим, что выполнение первых трех условий накладывает ограничения на углы ε_1, ε_3, а условия 4 и 5 – на габаритные размеры призм.

Математическим выражением двух первых условий являются неравенства (1) и (2):

$$\varepsilon_1 > \frac{1}{2}\left(\arcsin\left(\frac{1}{n_{\lambda 2}}\right) + \arcsin\left(\frac{\sin(\omega + \sigma')}{n_{\lambda 2}}\right)\right), \quad (1)$$

$$\varepsilon_1 < \arcsin\left(\frac{1}{n_{\lambda 3}}\right) - \arcsin\left(\frac{\sin(\omega + \sigma')}{n_{\lambda 3}}\right), \quad (2)$$

где $n_{\lambda 2}$, $n_{\lambda 3}$ – показатели преломления материала призмы для длин волн λ_2, λ_3 соответственно. Значение угла ε_1 выбирается из диапазона, определяемого (1) и

(2). При этом, чем меньше его значение, тем меньше углы падения лучей на цветоделительное покрытие ЦП1.

Третьему условию соответствует неравенство (3), которое определяет минимальное значение угла ε_3:

$$\varepsilon_3 > \frac{1}{2}\left(\arcsin\left(\frac{1}{n_{\lambda 6}}\right) + \arcsin\left(\frac{\sin(\omega + \sigma')}{n_{\lambda 6}}\right) + \varepsilon_1\right), \tag{3}$$

где $n_{\lambda 6}$ – показатель преломления материала призмы для длины волны λ_6. Увеличение угла ε_3 будет приводить к увеличению углов падения излучения на цветоделительное покрытие ЦП2, что, как указывалось ранее, приведет к ухудшению его работы. Поэтому целесообразно выбирать значение угла ε_3 вблизи минимума, определяемого (3).

Оставшиеся углы призм могут быть вычислены по формулам (4)÷(7) в соответствии с законами преломления и отражения света на основе расчета хода главного луча осевого пучка:

$$\varepsilon_2 = 2\varepsilon_1, \tag{4}$$

$$\varepsilon_4 = 2\varepsilon_3 - \varepsilon_1, \tag{5}$$

$$\varepsilon_5 = \frac{\pi}{2} + \varepsilon_1 - \varepsilon_3, \tag{6}$$

$$\varepsilon_6 = \pi - \varepsilon_5. \tag{7}$$

Анализ расчета хода лучей через призменную систему показал, что наиболее критичным элементом с точки зрения возможного ограничения пучков лучей является вторая призма. Таким образом, для выполнения четвертого условия необходимо определить ее габаритные размеры, обеспечивающие прохождение излучения без виньетирования. На рисунке 2 представлена развертка призменной системы с ходом лучей для канала, предназначенного для построения изображения в диапазоне длин волн (λ_5 – λ_6), без учета воздушного промежутка между первой и второй призмами.

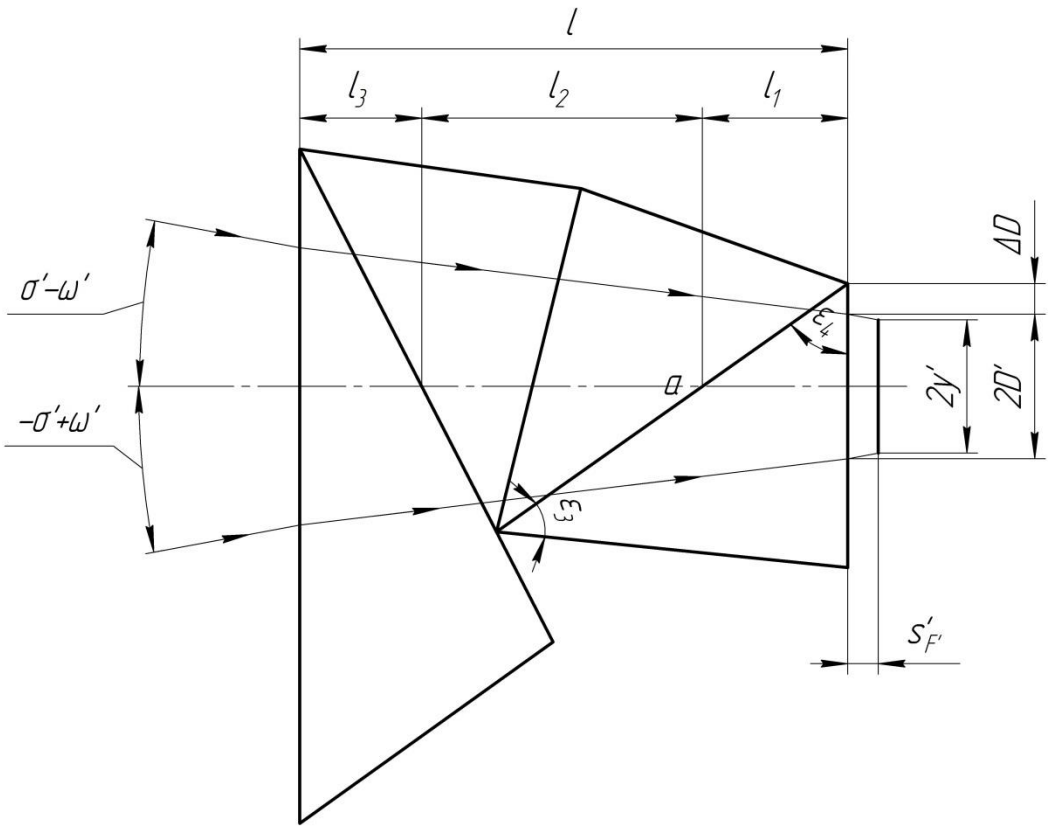


Рис. 2. Расчет габаритов второй призмы и длины оптического пути.

Из рисунка видно, что световые размеры граней второй призмы определяют лучи, падающие на цветоделительную систему под углами (σ'-ω') и (-ω'-σ'). Эти лучи формируют изображение размером 2y' на расстоянии $s'_{F'}$, от выходной грани призмы. Если пучок лучей, падающий на призменную систему под углом -ω', проходит ее без виньетирования, то высота верхнего луча этого пучка на выходной грани призмы равна

$$D' = y + tg(\omega' - \sigma')s'_{F'}. \tag{8}$$

С учетом увеличения светового размера D' на ΔD, что необходимо для закрепления призмы в оправе, минимальный размер ребра a второй призмы может быть определен по (9):

$$a_{min} = \frac{2(D'+\Delta D)\sin\left(\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{\sin(\omega' - \sigma')}{n_3}\right)\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{\sin(\omega' - \sigma')}{n_3}\right) - \varepsilon_4\right)}, \tag{9}$$

где n_3 – показатель преломления материала призмы для основной длины волны диапазона (λ_5 – λ_6). Минимальные размеры остальных ребер второй призмы вычисляются при помощи теоремы синусов.

Оптическая длина пути главного луча осевого пучка от первой до последней поверхности призмы в канале, предназначенном для построения изображения в диапазоне длин во ($\lambda_5 - \lambda_6$), определяется в соответствии (10)

$$l^{\text{опт}}_{(\lambda_5 - \lambda_6)} = (l_1 + l_2 + l_3)n_3, \tag{10}$$

где

$$l_1 = (D' + \Delta D)\text{tg}(\varepsilon_4), \tag{11}$$

$$l_2 = \frac{a_{min} - \dfrac{(D + \Delta D)}{\cos(\varepsilon_4)}}{\cos(2\varepsilon_3 - \varepsilon_4)} \sin(2\varepsilon_3), \tag{12}$$

$$l_3 = a_{min} - \frac{a_{min} - \dfrac{(D + \Delta D)}{\cos(\varepsilon_4)}}{\cos(2\varepsilon_3 - \varepsilon_4)} \cos(\varepsilon_4). \tag{13}$$

Отметим, что введение воздушного промежутка $d_в$ вдоль оптической оси между первой и второй призмой приводит к параллельному смещению главного луча осевого пучка, а вместе с ним плоскости изображения. Данное изменение компенсируется поперечным смещением первой призмы относительно второй на величину

$$\Delta y_в = d_в \frac{\sin(\arcsin(n_3 \sin \varepsilon_1) - \varepsilon_1)}{\sin(\frac{\pi}{2} - \arcsin(n_3 \sin \varepsilon_1))} \cos \varepsilon_1. \tag{14}$$

При этом длина оптического пути главного луча осевого пучка $l^{\text{опт}}_{(\lambda_5 - \lambda_6)}$ увеличится на

$$l_в = d_в \frac{1}{\sin(\frac{\pi}{2} - \arcsin(n_3 \sin \varepsilon_1))} \cos \varepsilon_1. \tag{15}$$

Габаритные размеры первой и третьей призм рассчитываются из условия равенства оптических путей главных лучей осевых пучков всех трех каналов

$$l^{\text{опт}}_{(\lambda_1 - \lambda_2)} = l^{\text{опт}}_{(\lambda_3 - \lambda_4)} = l^{\text{опт}}_{(\lambda_5 - \lambda_6)}. \qquad (16)$$

На основании (16) определяются размеры ребер *b* и *c* (рисунок 1):

$$b = \frac{l^{\text{опт}}_{(\lambda_1 - \lambda_2)}}{n_1 \sin(\varepsilon_2)}, \qquad (17)$$

$$c = 2\frac{\cos\varepsilon_4}{\sin 2\varepsilon_3}\cos(\varepsilon_4 - 2\varepsilon_3)\, l_2, \qquad (18)$$

где n_2 – показатель преломления материала призмы для основной длины волны диапазона $(\lambda_1 - \lambda_2)$.

Таким образом, использование формул (8-18) совместно с (1-7) позволяет определить все линейные и угловые размеры цветоделительной призменной системы.

Для удовлетворения пятого условия требуется, чтобы сумма заднего фокального отрезка системы объектив – призменная цветоделительная система и толщины редуцированной призменной системы не превышала задний фокальный отрезок объектива $s'_{F'\text{об}}$:

$$\frac{l^{\text{опт}}_{(\lambda_1 - \lambda_2)}}{n_1^2} + s'_{F'} \leq s'_{F'\text{об}}, \qquad (19)$$

Заключение

Предложенный метод расчета позволяет разрабатывать призменные цветоделительные системы для конкретных объективов с известными основными характеристиками, а именно фокусным расстоянием, угловым полем и относительным отверстием. При этом результатом расчета является система с оптимальными конструктивными параметрами, обеспечивающими прохождение оптического излучения с минимальными потерями при минимальных же габаритных размерах. Спектральные свойства разработанной системы будут зависеть от параметров интерференционных спектроделительных покрытий и корректирующих светофильтров в каждом из каналов и определяются на дальнейших этапах разработки.

Литература

1. De Lang H., Bouwhuis G. Colour separation in colour-television cameras // Philips Technical Review. 1962/63. Vol. 24, № 9. P. 263-298.
2. Архипов С.А., Потелов В.В., Сеник Б.Н. Особенности технологии изготовления высокоточных оптических призменных узлов и спектроделительных модулей для изделий с высокой пространственной ориентацией // Оптический журнал. Том 71, № 12, 2004. – С. 11-13.
3. Путилин Э.С. Оптические покрытия. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 227 с.
4. Patent 3202039 US. Optical system for a color television camera / H. de Lang, G. Bouwhuis filed 27.06.1961; publ. 24.08.1965.
5. Авторское свидетельство СССР 421970. Оптическая призменная система / Н.Г. Губачев. Заявл. 02.03.72; опубл. 30.03.74.
6. Patent 5777674 US. Four color separation optical device / R. Ohmuro filed 10.04.1995; publ. 07.07.1998.

УДК 004.932.2

Шевчук А.А.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЦВЕТОВОГО ТОНА ДЛЯ ВИЗУАЛЬНОГО АНАЛИЗА РАЗНОСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассмотрены особенности формирования цветового тона с помощью разноспектральных изображений, что позволяет повысить степень различения объектов наблюдаемой сцены.

Введение

Системы визуального контроля наземных сцен для пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов в настоящее время оснащаются несколькими спектральными каналами, количество которых может быть большим. Для оперативной оценки окружающей обстановки и сокращения времени визуального

анализа наблюдаемой сцены необходимо иметь возможность формирования единого результирующего изображения из нескольких разноспектральных изображений (РИ).

Понятие «объединение изображений» (image fusion) является частью более широкой концепции «объединения информации (данных)» (data fusion). Объединение информации (данных) – концепция, в которой определены методы и средства для объединения данных, поступающих из различных источников. Целью объединения является получение более высокого уровня качества информации, причем уровень качества информации зависит от области применения [1]. В этом процессе важное место занимает отображение, при котором необходимо обеспечить максимальное различение объектов интереса.

Большинство описанных в литературе подходов к решению задач объединения изображений применяется для обработки двух полутоновых РИ с отображением объединенного изображения в градациях серого [2, 3]. При формировании объединенного изображения из трех и более полутоновых изображений использования только контрастирования объектов по яркости недостаточно. Для расширения возможностей представления объектов интереса необходимо дополнительно к яркостному контрастированию использовать контраст по цветовому тону и насыщенности. В [4] предлагаются различные варианты отображения РИ в условных цветах.

В процессе формирования объединенного изображения из нескольких РИ с целью наибольшего различения объектов наблюдаемой сцены остро встает вопрос распределения цветового тона для наилучшего контрастирования объектов интереса.

Для распределения цветового тона необходимо использовать модель описания цветового тона, в которой можно легко оценить цветовое различие, и полученная оценка будет наилучшим образом удовлетворять цветовому различию, воспринимаемому человеком.

Распределение цветового тона

В [5] рассмотрены различные системы описания цвета, применяемые в телевидении и полиграфии, и приведен их анализ. В телевидении, например, наибольшее распространение получили системы *RGB, XYZ*, которые созданы Международной комиссией по освещению (МКО) в 1931 году. Система *XYZ* в отличии от *RGB* является аппаратно-независимой, что позволяет дать однозначную информацию о цвете без привязки к аппаратной части. Недостатком системы *XYZ* является то, что одинаковым изменениям численных координат цвета не соответствуют равнозначные изменения цветовых ощущений. Для того, чтобы уйти от недостатков существующих моделей, МКО разработала систему *LAB* (или *CIELAB* – математическая система оценки цвета), которая решила проблему разработки равноконтрастной цветовой системы и фактически моделирует процесс представления цвета аппаратом человеческого зрения.

В связи с тем, что система *LAB* является равноконтрастной и описание цвета в системе *LAB* соответствует особенностям восприятия цвета глазом человека, то при формировании единого изображения для визуального анализа остановимся на применении этой системы.

Любой цвет в системе *LAB* определяется светлотой *L* (*Luminance*) и двумя хроматическими компонентами: параметром *a*, который изменяется в диапазоне от зеленого до красного, и параметром *b*, изменяющимся в диапазоне от синего до желтого. Геометрический образ модели *LAB* – шар (см. рисунок 1) [6]. Данная система описания цвета является наиболее равноконтрастной, что позволяет просто выбирать доминирующий тон для каждого РИ.

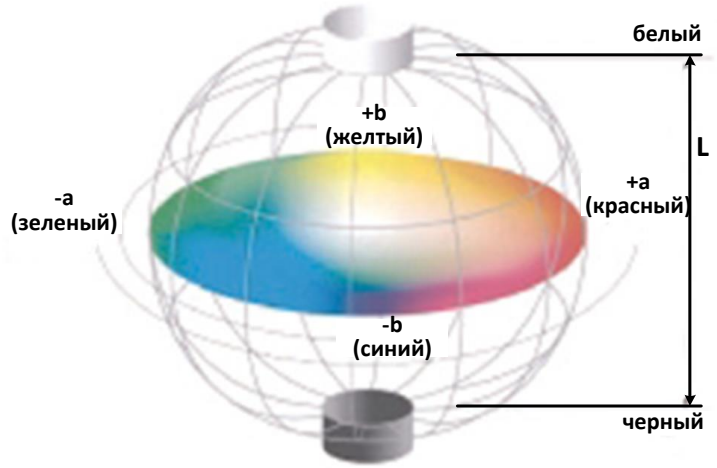


Рис. 1. Геометрический образ модели *LAB*.

Цветовой охват пространства модели *LAB* максимально близок к восприятию человека с нормальным зрением. Достоинством модели *LAB* является простота вычисления цветового различия (1), что позволяет выбрать цветовые тона, имеющие максимально возможное различие.

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{\left(L_2 - L_1\right)^2 + \left(a_2 - a_1\right)^2 + \left(b_2 - b_1\right)^2}\,, \qquad (1)$$

где ΔE_{ab} – цветовое различие между двумя точками в пространстве *LAB*; L_1, a_1, b_1 – параметры первой точки; L_2, a_2, b_2 – параметры второй точки. $\Delta E_{ab} \approx 2{,}3$ примерно соответствует минимально различимому для человеческого глаза отличию между цветами [7].

Необходимым условием корректного представления объединенного изображения в пространстве *RGB* является взаимно однозначное соответствие цветовых оттенков пространства *LAB* в пространстве *RGB*. Рассмотрим соответствие основных цветов пространств *LAB* и *RGB*. Пространство *RGB* обладает меньшим цветовым охватом по сравнению с пространством *LAB*. На рисунке 2 представлена область Ω значений цветовой плоскости пространства *LAB*, которые имеют взаимно однозначное соответствие в пространстве *RGB*.

Проверим значения цветового тона, которые выходят за пределы полученной области Ω (см. рисунок 2).

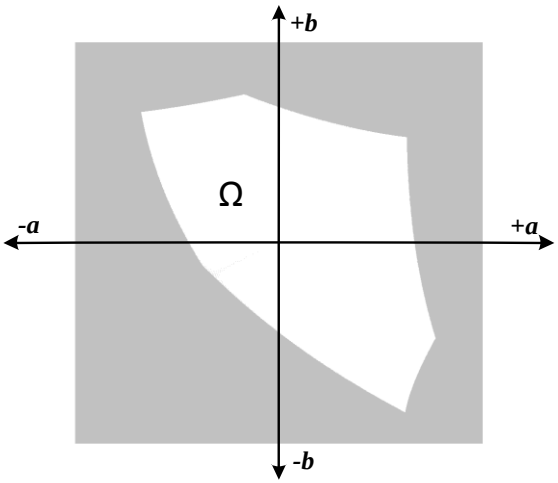
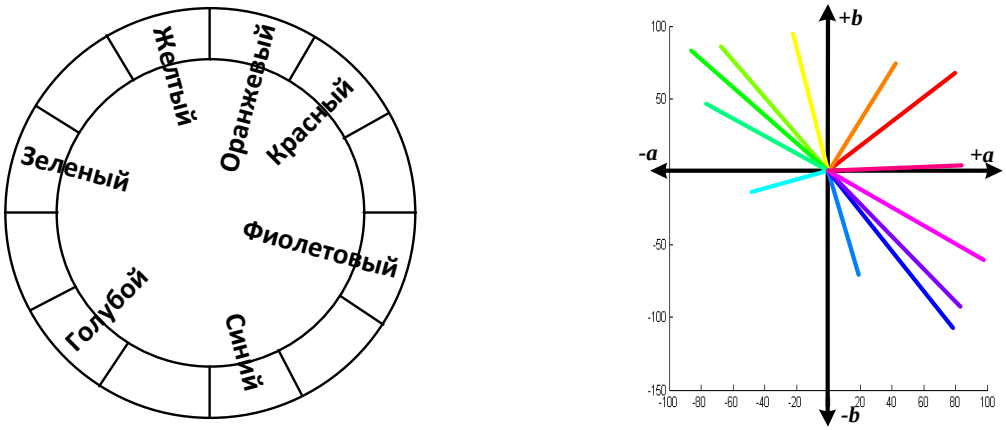


Рис. 2. Область значений пространства *RGB* в цветовой плоскости пространства *LAB*.

Для этого возьмем цветовую плоскость пространства *LAB* и отложим на ней семь основных цветов радуги: красный, оранжевый, желтый, зеленые, голубой, синий, фиолетовый. Вместе с основными цветами отложим недостающие цвета равноудаленные друг от друга. В итоге получается 12 цветов (см. ри-

сунок 3). Преобразуем выбранные цвета пространства *RGB* в цвета пространства *LAB*. Отобразим полученные значения в цветовой плоскости пространства *LAB* в виде векторов. Вектора, отображенные на рисунке 3 б, расположены внутри области Ω, а концы этих векторов находятся на границе области Ω.



а) б)

Рис. 3. Основные и недостающие цветовые тоны пространства RGB равноудаленные друг от друга а) в цветовом круге, б) в цветовом пространстве *LAB*.

Определим координаты цветового тона за границей области Ω, но не выходя за пределы пространства, вдоль каждого вектора цветового тона (см. рисунок 4). На рисунке 4 приведен пример определения координат для красного цветового тона.

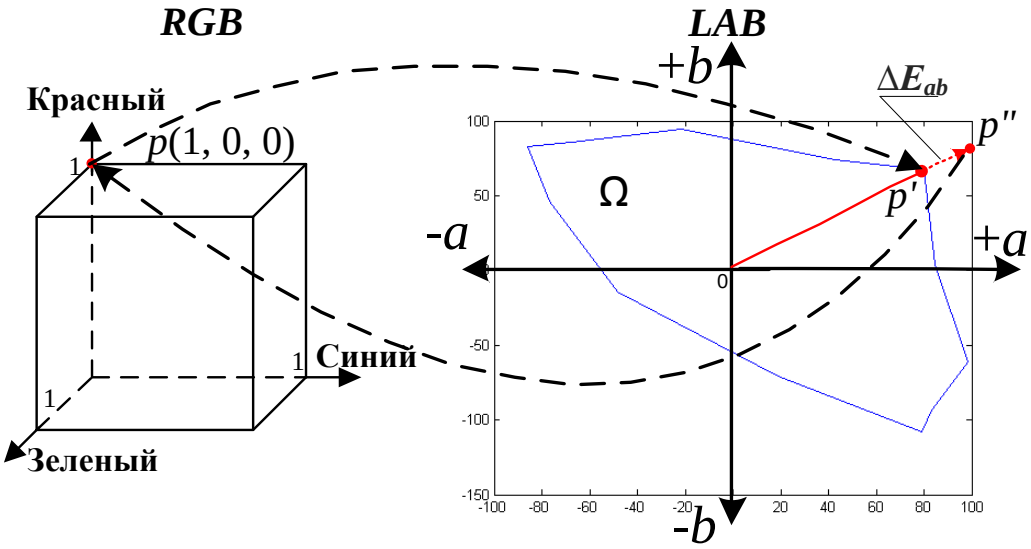


Рис. 4. Пример неоднозначного соответствия преобразования из пространства *LAB* в пространство *RGB* при выходе за границы области Ω.

В пространстве *RGB* возьмем точку *p*, соответствующую красному тону максимальной насыщенности. Определим цветовые координаты точки *p* в пространстве *LAB* – точка *p*'. Вычислим координаты точки *p*" по формуле (2), которая окажется за пределами области Ω при неизменном значении яркости *L*(*p*') = *L*(*p*")

$$p''(a,b) = k \cdot p'(a,b), \qquad (2)$$

где *k* – некоторый множитель, при котором точка *p*" не выходит за область определения пространства *LAB*, и в тоже время не принадлежит области Ω в цветовой плоскости пространства *LAB*.

Результат вычисления цветового различия ΔE_{ab} между точками *p*' и *p*" по формуле (1) демонстрирует значение цветового различия, которое значительно больше минимально различимого для человеческого глаза. Для визуализации на стандартном устройстве отображения необходимо выполнить преобразование из пространства *LAB* в пространство *RGB*. Результаты преобразования основных цветовых тонов, выходящих за границы области Ω, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты преобразования основных цветовых тонов.

Номер цветового тона, *N*	Исходная точка *p* в пространстве *RGB*			Цветовое различие ΔE_{ab} между точками *p*' и *p*"	Результат обратного преобразования точки *p*" из пространства *LAB* в *RGB*			Цветовое различие ΔE_{ab} между точками *p*' и p''_n
	R	*G*	*B*	ΔE_{ab}	*R*	*G*	*B*	ΔE_{ab}
1	255	0	0	18.8236	255	0	0	0.0000
2	255	128	0	15.3944	255	120	0	4.2784
3	255	255	0	17.4438	251	255	0	1.7056
4	128	255	0	19.6863	93	255	0	8.7633
5	0	255	0	21.5601	0	255	0	0.0000
6	0	255	128	16.1593	0	255	109	8.8165
7	0	255	255	9.0207	0	255	255	0.0000
8	0	128	255	13.2069	0	128	255	0.0000
9	0	0	255	24.0869	0	0	255	0.0000
10	128	0	255	22.4994	125	0	255	0.7590
11	255	0	255	20.8021	255	0	255	0.0000
12	255	0	128	15.2370	255	0	128	0.0000

Таким образом, на основании данных приведенных в таблице 1 можно отметить, что большое цветовое различие в пространстве *LAB*, которое в 10 раз может превышать минимально различимое для человеческого глаза отличие, вне области Ω, при преобразовании с целью визуализации в *RGB* будет сведено к минимальному или даже к нулю (см. рисунок 5).

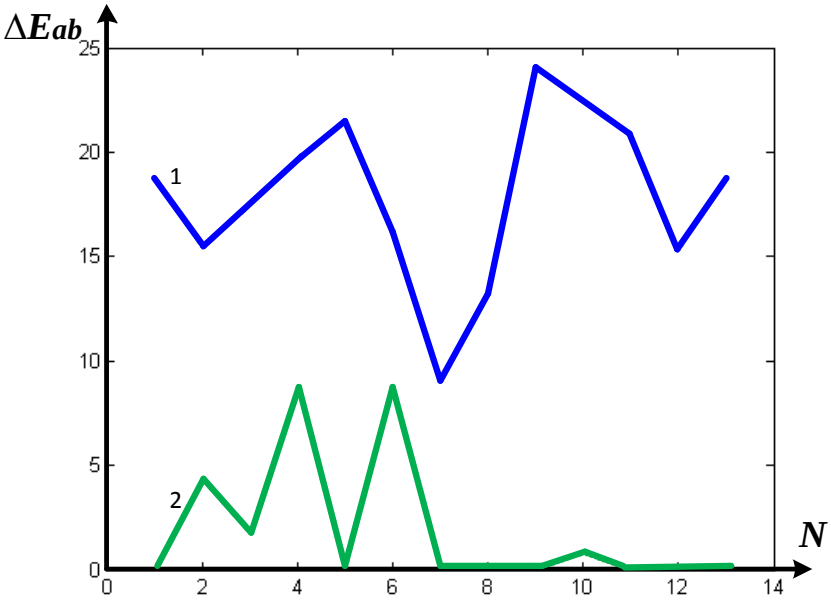


Рис. 5. Цветовое различие между точками цветового тона в пространстве *LAB* до преобразования в *RGB* (1) и после преобразования в *RGB* (2).

Кривая 1 отражает цветовое различие между точками p' и p'' в цветовой плоскости пространства *LAB* за пределами области Ω. Для оценки уменьшения цветового различия выполнено двойное преобразование этих точек *LAB* -> *RGB* -> *LAB*, и определены цветовые различия для новых точек p' и p''_n, что отражает кривая 2.

С учетом полученных ограничений предлагается распределять цветовой тон следующим образом. Цветовые тоны распределяются в пространстве *LAB* с учетом максимального возможного различия между ними. В пространстве *LAB* максимальное различие цветового тона определяется по формуле (1) и, учитывая это обстоятельство, одним из возможных вариантов выбора основных тонов является максимально возможный угол между тоновыми векторами. На рисунке 6 приведен пример выбора основных цветовых тонов для объединения трех РИ, причем максимальное значение цветового тона должно лежать на границе

области Ω. При этом условии будет обеспечено максимальное цветовое различие объектов наблюдаемой сцены на объединенном изображении.

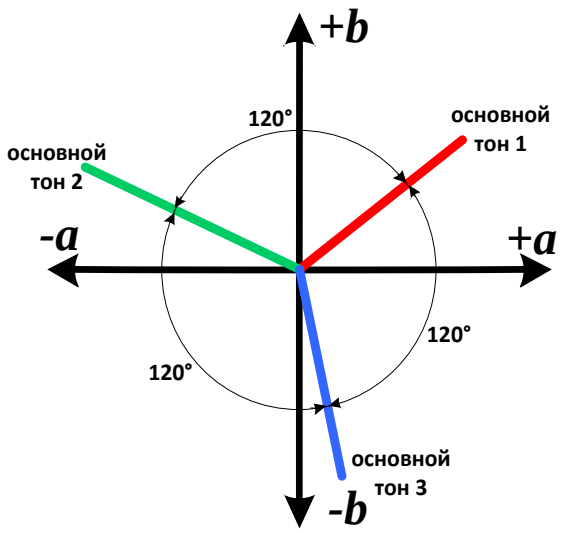


Рис. 6. Выбор основных цветовых тонов для объединения трех РИ.

На рисунке 7 приведены спектральные характеристики излучения четырех объектов и отмечены зоны ($\Delta\lambda_1$, …, $\Delta\lambda_4$), в которых ведется регистрация излучения от этих объектов.

На рисунке 9 приведен результат распределения цветового тона для тестовых РИ (см. рисунок 8 а-г) без формирования *L* – компоненты. Для формирования полноценной картины объединенного изображения в качестве *L* – компоненты взята функция радиального градиента.

На рисунке 9 а) представлено объединенное изображение, в котором при распределении цветового тона в пространстве *LAB* все точки изображения находились внутри области Ω. При этом отмечается недостаточная цветовая насыщенность объектов и хорошо различим градиент *L* – компоненты.

На рисунке 9 б) представлено объединенное изображение, в котором выполнялась коррекция насыщенности цветового тона до максимального значения в пределах границы области Ω. При этом отмечается повышение цветовой насыщенность объектов и снижение различимости градиента *L* – компоненты.

На рисунке 9 в) представлено объединенное изображение, в котором выполнялась коррекция цветовой насыщенности, при этом некоторое множество точек вышло за границы области Ω. При этом отмечается избыток цветовой насыщенности объектов и при этом для некоторых объектов различимость градиента *L* – компоненты не обнаруживается.

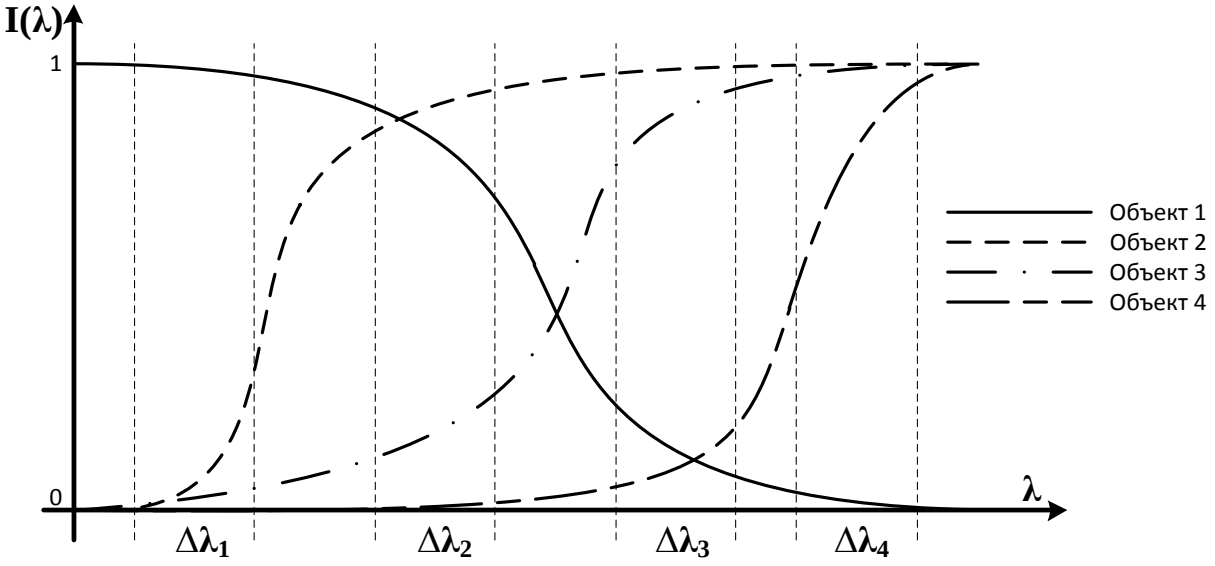
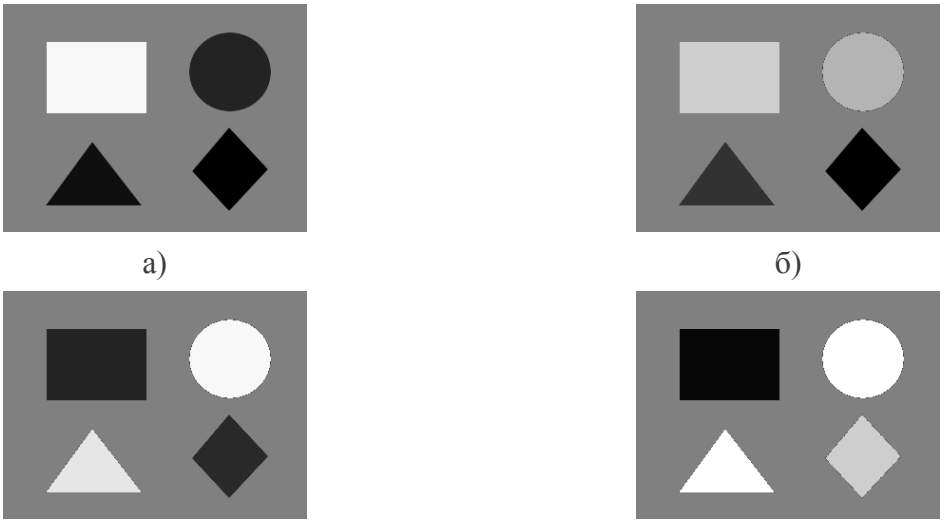


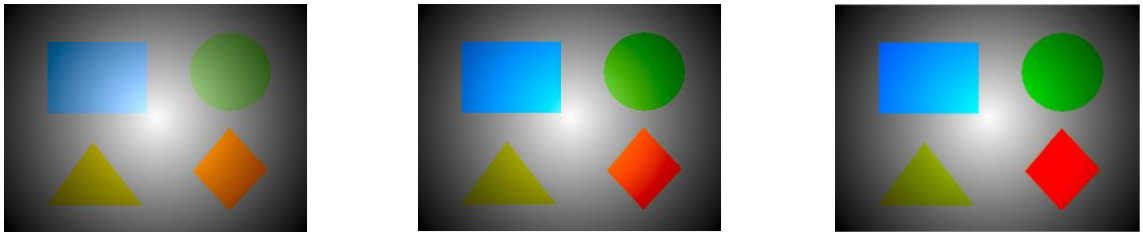
Рис. 7. Спектральные характеристики и зоны регистрации четырех тестовых объектов.



а) б)

в) г)

Рис. 8. Изображения формируемые в зонах а) $\Delta\lambda_1$; б) $\Delta\lambda_2$, в) $\Delta\lambda_3$, г) $\Delta\lambda_4$
(Объект №1 – прямоугольник; Объект № 2 – круг;
Объект №3 – треугольник; Объект № 4 – ромб).



а) б) в)

Рис. 9. Результаты распределения цветового тона для совместной визуализации тестовых РИ с разной степенью насыщенности цветового тона в пространстве *LAB*.

Заключение

Совместная визуализация РИ в условных цветах с учетом рассмотренных особенностей формирования цветового тона позволяет повысить степень различения объектов наблюдаемой сцены на объединенном изображении.

В свою очередь, нарушение взаимно однозначного соответствия, формируемых значений цветового тона в пространстве *LAB* и допустимых значений пространства *RGB*, приводит к уменьшению цветового различия между цветовым тоном элементов изображения, что приводит к снижению детализации на объединенном изображении.

Указанные особенности формирования цветового тона для совместной визуализации могут быть использованы для объединения РИ, количество которых может быть больше трех.

Литература

1. Wald L. Some terms of reference in data fusion // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, May 1999. – Vol. 37, № 3, P. 1190-1193.
2. Инсаров В.В., Тихонова С.В., Михайлов И.И. Проблемы построения систем технического зрения, использующие комплексирование информационных каналов различных спектральных диапазонов // Приложение к журналу «Информационные технологии» № 3, 2014. – 32 с.
3. Соколов В.В., Норка Ю.А., Карпенко С.М., Николаев Д.П. О визуализации мультиспектральных изображений, сохраняющей локальный контраст // Труды института системного анализа РАН. Том 45, 2009. – С. 183-193.
4. Сагдуллаев Ю.С., Ковин С.Д. Восприятие и анализ разноспектральных изображений: Монография. – М.: Издательство «Спутник +», 2016. – 251 с.
5. Ложкин Л.Д., Неганов В.А. Цвет, его измерение, воспроизведение и восприятие в телевидении. В двух частях. – Самара: ПГУТИ, 2013. – 286 с.
6. Система управления цветом [Электронный ресурс]. URL: http://www.bazilprint.ru/color_manage/color_man.php.
7. Sharma G. Digital Color Imaging handbook CRC Press LLC, 2003. – 816 с.

УДК 621.233.3/9

Пахомов С.Н.

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ПРИВОД ДЛЯ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМ

В ЗАО «МНИТИ» разработан малогабаритный редукторный привод, превосходящий по техническому уровню зарубежные аналоги.

В состав редукторного привода входят зубчатые колеса радиусного зацепления, которые изготовлены на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ, но в перспективе их производство ориентировано на современную электрохимическую обработку (ЭХО).

Применяя в разработках управляемый привод телевизионных оптико-электронных систем, специалисты ЗАО «МНИТИ» используют не только свой опыт, но и исследования в этой области организаций, которые профессионально занимаются подобными проблемами, учитывают мировые достижения и тенденции развития подвижных систем.

Критериями выбора привода традиционно остаются меньшие габариты, большой крутящий момент, высокая кинематическая точность, большой КПД, технологичность изготовления, меньшая стоимость и высокий коэффициент технического уровня.

Широкую известность в мире получила Швейцарская фирма Maxon motor [1]. Более, чем в 30 странах она имеет своих представителей. Фирма является мировым лидером по поставке высокоточных приводов и систем мощностью до 500 ватт (рисунок 1).

Рис. 1. Номенклатура изделий фирмы Maxon.

Реализованный модульный принцип построения привода имеет в своем составе коллекторные и бесколлекторные двигатели, плоские двигатели (рисунок 2),

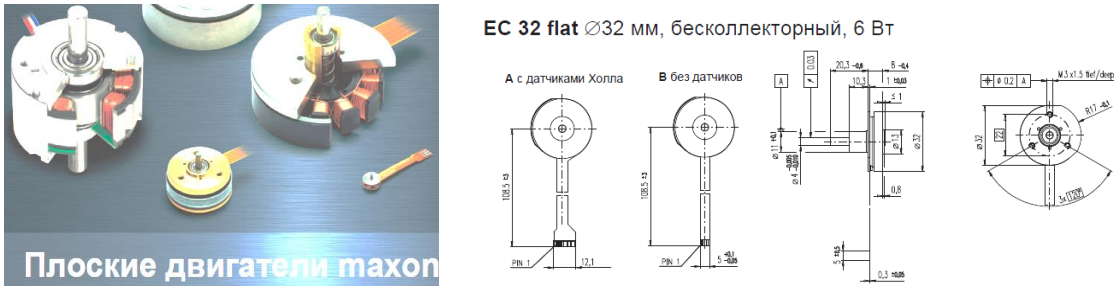


Рис. 2. Плоские двигатели.

планетарные редукторы (рисунок 3),

Рис. 3. Планетарные редукторы.

датчики (рисунок 4) и управляющую электронику.

Рис. 4. Датчики фирмы Maxon motor.

Модульная система Maxon из двигателей, редукторов, датчиков, тормозов и контроллеров допускают почти бесконечное количество возможных комбинаций для требуемого применения (рисунок 5).

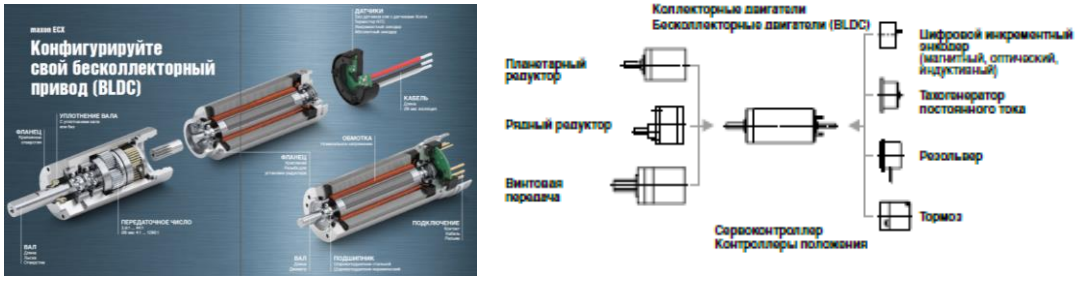


Рис. 5. Комбинации привода из комплектующих фирмы Maxon.

Подсказкой выбора варианта привода могут служить результаты сравнения редукторного двигателя (рисунок 6) и двигателя прямого привода для мотор-колеса велосипеда [2].

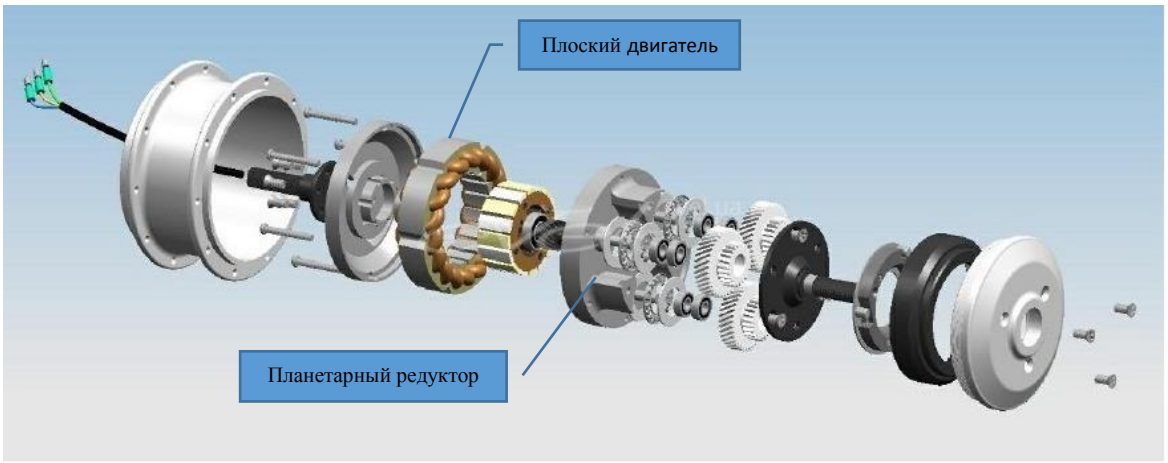


Рис. 6. Конструкция редукторного привода мотор-колеса велосипеда.

При одинаковой мощности и скорости, редукторный двигатель имеет на 30-35% больше вращающий момент, экономнее расходует энергию аккумулятора на 25-30%. К тому же редукторный двигатель в два раза меньше по габаритам и весу. Получить таких результатов позволяет применение плоского двигателя и планетарного редуктора с передаточным отношением эвольвентных колес примерно 10:1. Фирма Maxon разработала широкий ряд плоских безколлекторных двигателей диаметром 9.2-90 мм.

Используемый фирмой планетарный редуктор на порядок увеличивает крутящий момент, объясняя малую массу и размеры применяемого двигателя. Выбранная схема планетарного редуктора повторяет, хорошо зарекомендовавшую конструкцию в силовых передачах [3], схему редуктора Джеймса, показанную на рисунке 7.

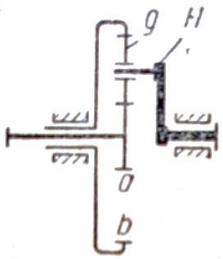
2К-Н одноступенчатая (редуктор Джемса) $i(H)<0$	I 	При $n_b = 0$ $i^b_{aH} = \frac{n_a}{n_H} = 1 + \frac{z_b}{z_a}$ При $n_a = 0$ $i^a_{bH} = \frac{n_b}{n_H} = 1 + \frac{z_a}{z_b}$	2,7—8 1,14—1,6

Рис. 7. Кинематическая схема редуктора Джеймса.

Особенностями редуктора Джеймса являются малые мощности в зацеплении, которые характеризуются малыми реакциями на сателлитах, которые расположены по разные стороны относительно осей сателлитов, и применением внутреннего зацепления. Вид зацепления указывает на небольшие относительные скорости скольжения профилей зубьев, находящихся в зацеплении.

Однако получить внутреннее зацепление эвольвентного профиля не простая технологическая задача. И связана она с применением специального инструмента и специализированного зубодолбежного оборудования [4].

Даже при наличии долбяков и зубодолбежных станков получить внутреннее зацепление с разностью у зубчатых колес в один зуб при наличии в зацеплении интерференции достаточно сложная задача [5].

Для обеспечения отсутствия среза головок зубьев, подрезания и заострения зубьев колес при их нарезании и заклинивании передач в работе для прямозубых некорригированных передач со стандартным исходным контуром, необходимо, чтобы при z2>80 разность между числом зубьев нарезаемого колеса и числом зубьев долбяка была не менее 19, а число зубьев долбяка больше 16 – 20. Значение величин минимально допустимой разности чисел зубьев сцепляющихся колес (Z2-Z1) приведены на рисунке 8 [6].

7. Значения $z_{c\,min} = (z_2 - z_1)_{min}$ для некорригированных передач внутреннего зацепления ($\alpha_0 = 20°$; $f_0 = 1$)

z_2	$(z_2 - z_1)_{min}$	z_2	$(z_2 - z_1)_{min}$
25—40	8	100—180	5
40—80	7	180—200	4
80—100	6	200—210	3

Рис. 8. Минимально допустимая разность чисел зубьев эвольвентных колес.

Перечисленные ограничения заставили разработчиков ЗАО «МНИТИ» искать альтернативу эвольвентному зацеплению [7]. Так было создано радиусное зацепление, которое было смоделировано и изготовлено для нужд нестандартного оборудования института (рисунок 9).

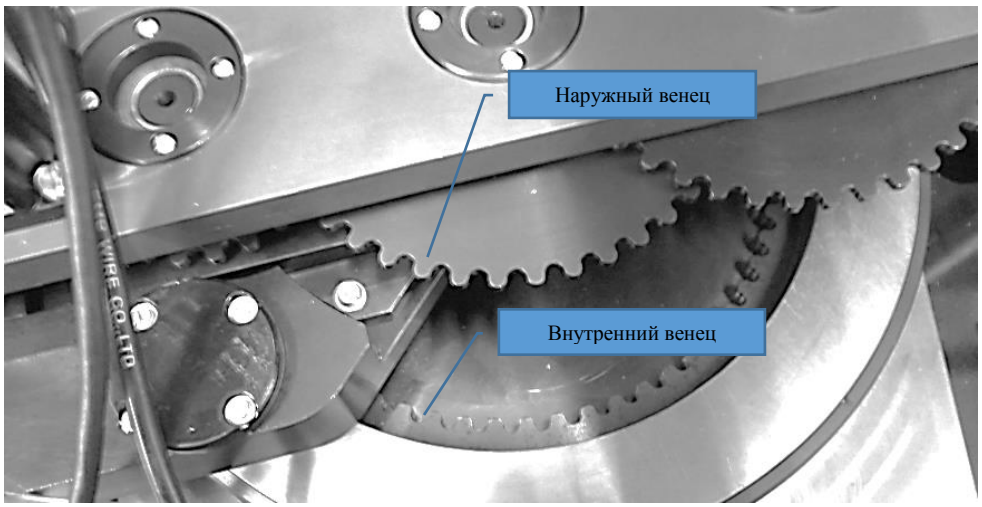
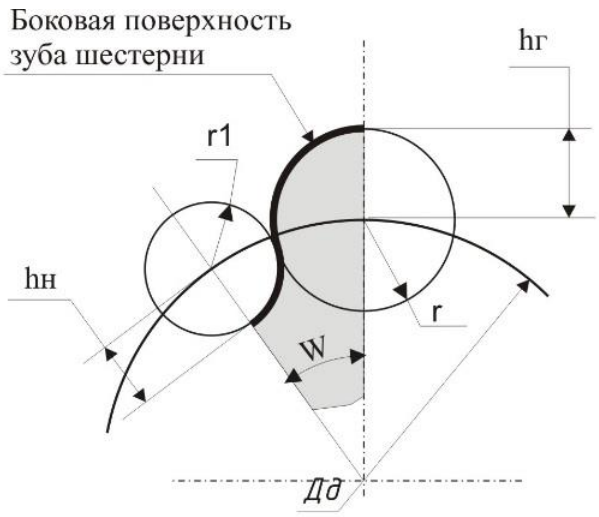


Рис. 9. Фрагмент радиусного зацепления.

Своему названию оно обязано радиусам, которые формируют высоту головок и ножек зубьев. Радиусы ножек зубьев являются касательными к радиусам головок зубьев. Это условие позволило математически выразить между ними зависимость, через модуль m, принятый в эвольвентном зацеплении за коэффициент пропорциональности, через который определяются остальные размеры зубчатого колеса (рисунок 10).



Zш	Число зубьев шестерни	
m	Модуль	m = 1,2732 r
Дд	Делительный диаметр шестерни	Дд= m Zш
W	Угол охвата боковой поверхности зуба	W=180°/Zш
r	Радиус головки зуба шестерни	r = 0,7854 m
hг	Высота головки зуба шестерни	hг= r
r1	Радиус ножки зуба шестерни касательный к радиусу головки r1 = m·Zш·sin(90°/Z) - r	
hн	Высота ножки зуба шестерни	hн= r1

Рис. 10. Исходные данные шестерни.

Исходные данные шестерни (рисунок 10) полностью определяют ее геометрию и отражают ее независимость от зубчатого колеса, с которой она составляет пару. Это позволяет сделать следующие выводы.

1. Использовать для шестерен радиусного зацепления стандартизированные значения модуля по ГОСТ 9563-80.
2. У шестерен нет ограничений по числам зубьев.
3. Можно предварительно для шестерен создавать банк изделий, сортируя их по модулю и числам зубьев.
4. Применять для профилирования сопряженных зубьев ответного колеса второй способ Оливье, который предусматривает известную поверх-

ность зубьев шестерни и передаточное число, которое необходимо реализовать в проектируемой передаче.

5. Позволяет реализовать равенство радиусов головок зубьев шестерни с радиусами головок ножек зубьев колеса, которое находится с ним в зацеплении.
6. Боковые поверхности зубьев шестерни и зубьев колеса радиусного зацепления состоят из касательных между собой радиусов.

Принимая во внимание перечисленные выводы при создании геометрии колеса, составляющего с шестерней зацепление, необходимо учитывать замечания, сформулированные для эвольвентного зацепления: Никаких заранее определенных углов зацепления, линий зацепления, полюсов, начальных окружностей и высот головок и ножек у отдельно взятого эвольвентного зубчатого колеса не существует; они определяются только при зацеплении двух колес [3, с. 415]. Эти замечания приходят на помощь при создании радиусного внутреннего зацепления с разностью колес в один зуб (рисунок 11).

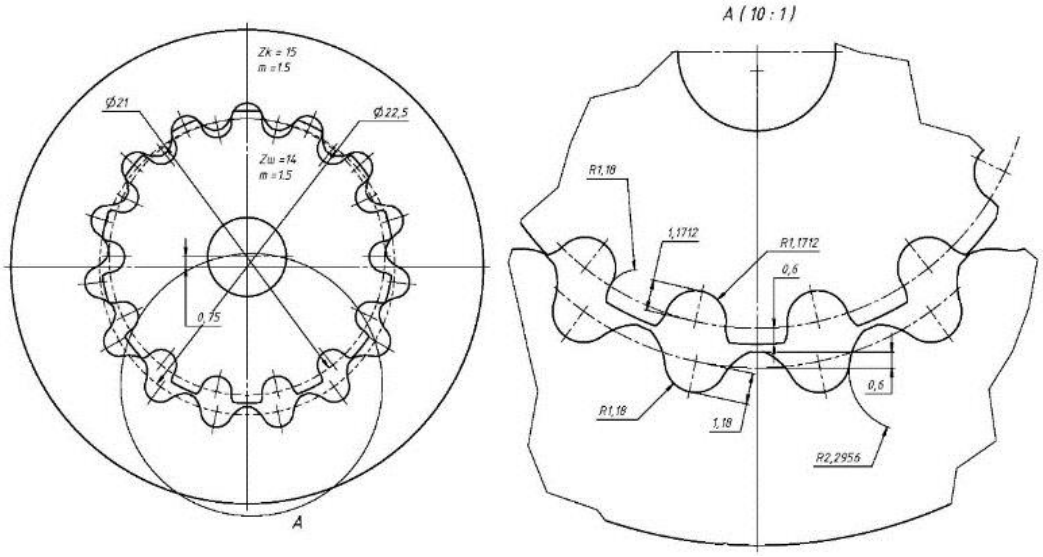


Рис. 11. Пример внутреннего радиусного зацепления с разностью в 1 зуб.

Для создания радиусного зацепления были изменены традиционные подходы проектирования зубчатых передач. С помощью компьютерного моделирования объектом исследования стал не исходный контур зуборезного инструмента, а контур самих зубьев зубчатых колес, составляющих передачу шестерни и колеса. Для нарезания прямозубых колес наружного и внутреннего зацепления был применен стандартный инструмент в виде концевой фрезы (рисунок 12) и вертикально-фрезерный станок ЧПУ под управлением системы FANUC.

Венцы зубчатых колес представляли собой траектории перемещения режущих кромок инструмента.

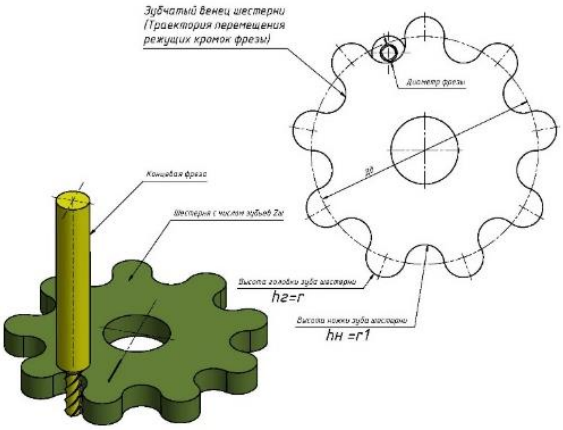


Рис. 12. Нарезание зубчатых колес концевой фрезой.

Теперь на стадии проектирования был задействован мощнейший математический аппарат программного обеспечения, который не уступал возможностям дифференциальной геометрии, традиционно выступающий при расчете сопряженных профилей.

Точность, наглядность и простота использования трехмерного моделирования при расчете профилей зубчатых колес заставили признать, что классическая теория зацеплений не во всем отвечает высоким требованиям 3D моделирования [8].

Когда при механическом нарезании радиусного зацепления приходится контролировать четвертый знак после запятой, возникает опасность, что усилия резания способны отклонять концевую фрезу от теоретической траектории профиля нарезаемого зуба колеса. Тогда на помощь приходит электрохимическая обработка (ЭХО), имеющая следующие основные преимущества [9].

1. Никакого силового взаимодействия между заготовкой и инструментом.
2. За счет возможных максимальных показателей шероховатости поверхности, достигающей Ra 0,01-0,002, а так же разрешающей способности в процессе копирования (< 1 мкм) исключается необходимость выполнения привычных завершающих манипуляций: полировки и шлифования.
3. Практически отсутствует износ электрода.
4. Технология ЭХО не сопряжена с изменением структуры поверхности и ее нагревом.

5. В процессе размерной электрохимической обработки происходит прямое или обратное копирование на обрабатываемой заготовке формы и размеров электрода-инструмента сразу по всей поверхности заготовки.
6. В результате только одного поступательного движения электрода инструмента в координате Z за небольшой промежуток времени можно получить готовые детали зубчатых колес с хорошими показателями точности, шероховатости.

Инструмент-электрод изготавливается из любого токопроводящего материала, в основном используется медь, латунь, бронза как наиболее легко обрабатываемые традиционном механическим способом и коррозионностойкие к агрессивной среде методами, как традиционного проектирования, так и с применением вычислительной техники.

Таким образом, эвольвентное зацепление лишилось главного своего технологического преимущества перед другими видами зубчатых передач эпициклоидного профиля [10].

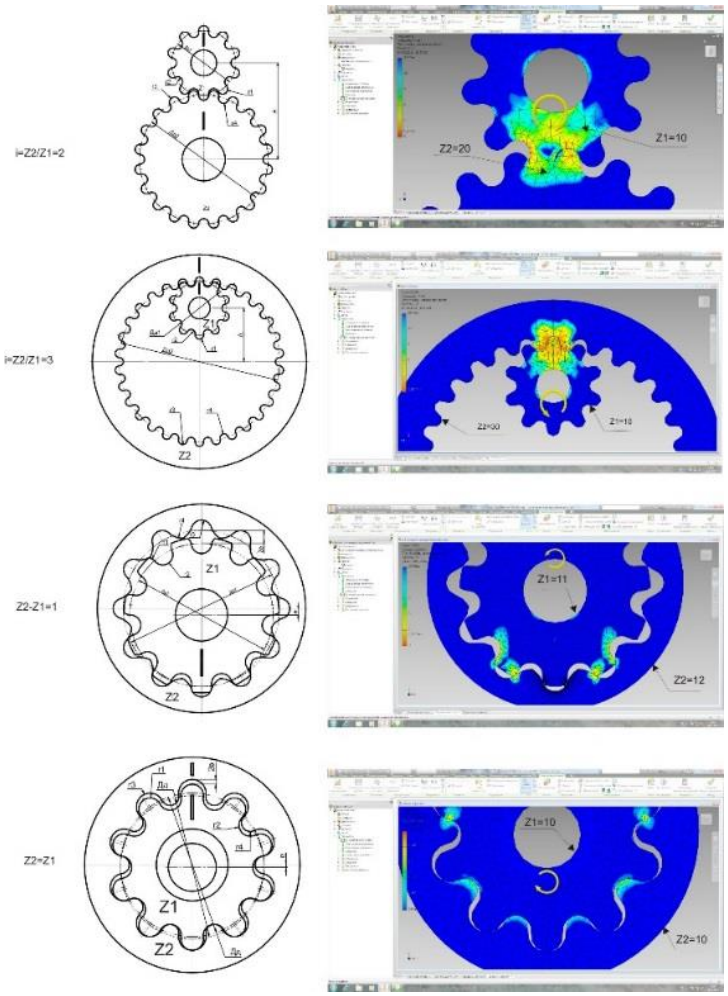


Рис. 13. Варианты зубчатых колес радиусного зацепления.

В ЗАО «МНИТИ» с помощью радиусного зацепления удалось реализовать наружное зацепление без ограничения в числах зубьев у сцепляющихся колес. Нарезать внутреннее зацепление без применения долбяков и зубодолбежных станков (рисунок 13).

Создать внутреннее радиусное зацепление с разностью в один зуб у сцепляющихся колес без явления интерференции (рисунок 14).

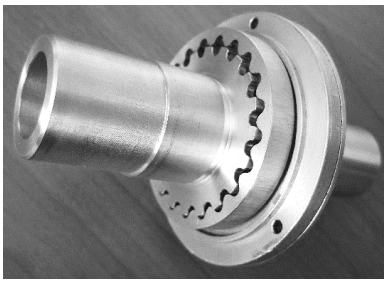


Рис. 14. Внутреннее радиусное зацепление с разностью в один зуб.

Радиусное зацепление позволило всего двумя парами зубчатых колес реализовать весь диапазон передаточных отношений, на который фирме Maxon motor потребовалось в 3-4 раза больше зубчатых колес [11].

В ЗАО «МНИТИ» разработана малогабаритная конструкция планетарно–радиусного редуктора (рисунок 15), которая по техническому уровню превосходит зарубежные аналоги [12].

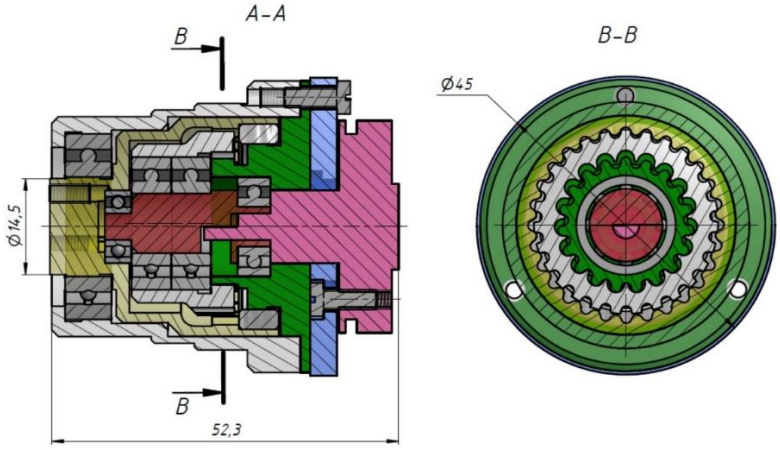


Рис. 15. Планетарно-радиусный редуктор с i = 28.

Ограниченные объемы, в которых размещаются проектируемые ЗАО «МНИТИ» оптико-электронные телевизионные системы привели к созданию

конического радиусного зацепления [13], которое изменяет направление привода, следуя свободному пространству в изделии (рисунок 16).

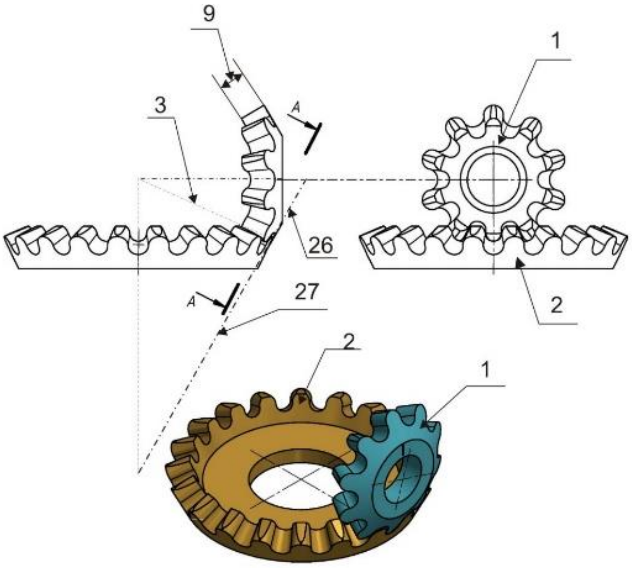


Рис. 16. Радиусная коническая передача по патенту № 2592032.

Особенностями запатентованной радиусной конической передачи стало реализация внутреннего конического зацепления с разностью в один зуб у сцепляющихся колес. Благодаря этому появилась возможность создавать прецессирующие передачи с большими передаточными отношениями и регулируемым люфтом [14].

Выводы

1. В ЗАО «МНИТИ» разработан малогабаритный редукторный привод, превосходящий по техническому уровню зарубежные аналоги.
2. В состав редукторного привода входят зубчатые колеса радиусного зацепления, которые изготовлены на вертикально-фрезерном стане с ЧПУ, но в перспективе ориентированы на современную электрохимическую обработку (ЭХО).
3. С помощью ЭХО можно обрабатывать радиусные зубчатые колеса наружного зацепления, внутреннего зацепления, в том числе с разностью в один зуб, ортогональные конические колеса и конические колеса внутреннего зацепления для прецессирующих передач с хорошими показателями точности и шероховатости.
4. Радиусная коническая передача защищена патентом РФ № 2592032.

Литература

1. Каталог Maxon motor 2016-2017 [Электронный ресурс]. URL: http://aviton.spb.ru/files/doc/downloads/Elektroprivod/maxon_motor_2016-17_en.pdf.
2. Мотор-колесо R100, 350W/36v [Электронный ресурс]. URL: https://ecoelectro.com.ua/velo-motor-koleso-f85-350w-36v-perednee.html.
3. Краткий справочник машиностроителя // Под ред. Чернавского С.А. – М.: Машиностроение, 1966. – 797 с.
4. Кирютин А.С. Анализ способов и применяемого зуборезного инструмента для обработки колес внутреннего зацепления с эвольвентным профилем // Современная техника и технологии. № 3, 2014.
5. Артоболевский И.И. Теория механизмов. – М.: Наука, 1967. – 720 с.
6. Справочник конструктора точного приборостроения. Под редакцией д.т.н., проф. Литвина Ф.Л. – М.-Л.: Машиностроение, 1964.
7. Пахомов С.Н. Радиусная альтернатива эвольвентному зацеплению // Современная техника и технологии. № 1, 2016.
8. Бабичев Д.Т., Волков А.Э. История развития теории зубчатых передач // Вестник научно-технического развития. № 5, 2015. – С.25-42.
9. Преимущество использования электрохимических станков над электроэрозионными [Электронный ресурс]. URL: http://stankofinexpo.ru/.
10. Калашников С.Н., Калашников А.С. Зубчатые колеса и их изготовление. – М.: Машиностроение, 1983. – 264 с.
11. Пахомов С.Н. Кинематические схемы редукторов с радиусным зацеплением // Современная техника и технологии. № 2, 2016. [Электронный ресурс]. URL: http://technology.snauka.ru/2016/02/9558.
12. Пахомов С.Н. Планетарно-радиусный редуктор // Современная техника и технологии. № 4, 2016.
13. Патент РФ № 2592032. Радиусная коническая передача / Пахомов С.Н. Приоритет от 31 марта 2015 г.
14. Пахомов С.Н. Внутреннее коническое зацепление // Современная техника и технологии. № 2, 2016.

УДК 519.244.2

Дзюба В.И., к.т.н.
Егоренко А.С.

О МЕТОДИКЕ КОНТРОЛЯ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАННЫХ ФУНКЦИЙ

Приводятся конкретные рекомендации для определения планов при одноступенчатом методе испытаний с целью контроля вероятности выполнения заданных функций при разработке методик испытаний изделий.

При разработке и изготовлении изделий, например, при составлении и реализации программ предварительных и периодических испытаний для выполнения требований, заданных в тактико-техническом задании (ТТЗ) или в технических условиях (ТУ), прежде всего, необходимо определить план испытаний – совокупность правил, устанавливающих объем выборки, порядок проведения испытаний, критерии их завершения и принятия решений по результатам испытаний.

Рассмотренные ниже ситуации относятся к одноступенчатому (выборочному) контролю, при котором решение о приемке или отклонении партии в соответствии с определенными правилами принимают на основе результатов контроля, получаемых из одной выборки заранее определенного объема.

В ряде случаев необходимо подтверждение вероятности выполнения каких-либо функций посредством разработки методик контрольных испытаний с последующей их реализацией.

В качестве примеров записей требований к вероятности выполнения каких-либо функций в ТТЗ и ТУ, имевших место в практической деятельности авторов, можно привести следующие:

а) вероятность захвата и устойчивого сопровождения цели должна быть не менее 0,9 (для следящей системы);

б) вероятность наблюдения разрешающей способности со значением не ниже заданного должна быть не менее 0,95 (для системы мониторинга, установленной на летательном аппарате);

в) коэффициент ошибок в одной регистрации максимального объема – не более 10^{-9} (для системы обработки информации). Этот показатель следует по-

нимать как максимальную вероятность ошибки при записи информации (q). Следовательно, $p = 1 - q$ будет являться вероятностью правильности записи.

Одним из возможных вариантов подтверждения этих вероятностей (методик контроля, включаемых в программы испытаний) является многократная успешная реализация требуемой функции при проведении испытаний.

Такая постановка задачи является частным случаем общей задачи о доверительном интервале для вероятности [1].

В этом случае испытания проводятся путем осуществления подряд n необходимых успешных реализаций требуемой функции, при которых не наблюдалось ни одного случая невыполнения этой функции, а n определяется по формуле:

$$n = \frac{\ln(1-\beta)}{\ln p}, \qquad (1)$$

где:

p – заданная вероятность выполнения требуемой функции;

β – заданная доверительная вероятность для доверительного интервала, построенного для вероятности p по n реализациям, в каждой из которых наблюдалось выполнение требуемой функции.

Формула (1) для определения n получена из условия $(1 - p_2)^n = 1 - \beta$,
где:

p_2 – заданная верхняя граница вероятности невыполнения требуемой функции ($p_2 = 1 - p$);

$(1 - p_2)^n$ – вероятность того, что в n опытах ни разу не было невыполнения требуемой функции;

$(1 - \beta)$ – доля случаев (вероятность невыполнения требуемой функции), выходящих за верхний предел доверительного интервала.

Проиллюстрируем предлагаемую методику:

Для примера а) при $p = 0{,}9$ и $\beta = 0{,}8$ получим $n = 15$.

Изделие считается выдержавшим испытания, если при реализации $n = 15$ захватов не было ни одного сбоя.

Для примера б) при $p = 0{,}95$ и $\beta = 0{,}7$ получим $n = 24$.

Изделие считается выдержавшим испытания, если при реализации подряд $n = 24$ полетов не было случая наблюдения разрешающей способности ниже заданной.

Пример расчета количества необходимых n успешных реализаций (n - кратно осуществляемых подряд реализаций требуемой функции, при которых не наблюдалось ни одного случая невыполнения этой функции) для различных заданных:

– вероятности выполнения требуемой функции $p = 1 – q$;

– доверительной вероятности β приведен в таблице 1.

Таблица 1.

p / β	0,95	0,9	0,8	0,7
0,95	59	45	32	24
0,9	29	22	15	11
0,8	13	10	7	5
0,7	8	6	5	3

В таблице 1 показано количество успешных реализаций – n для различных p и β примеров а) и б).

Для примера в) задача ставится следующим образом:

– определить минимально необходимый объем записываемой информации, т.е. необходимое количество (n) осуществляемых подряд реализаций (например, комбинаций 0, 1), при которых не наблюдалось ни одной ошибки при контроле правильности записи с заданными:
– максимальной вероятностью ошибки при записи информации (q);
– доверительной вероятностью (β) для доверительного интервала, построенного для вероятности $p = 1 – q$ по n реализациям, в каждой из которых наблюдалась правильность записи.

При β = 0,9 и $p = (1 – q) = 0{,}999999999$ по формуле (1) получим:

$n = ln(0{,}1) / ln(0{,}999999999) = 2{,}3 \cdot 10^9$.

Испытания считают успешными, если при записи подряд $n = 2{,}3 \cdot 10^9$ реализаций не было ни одной ошибки.

Минимально необходимый объем записываемой информации, при которых не наблюдалось ни одной ошибки при контроле правильности записи с заданными:

– максимальной вероятностью ошибки при записи информации $q = 10^{-9}$;

– различными значениями доверительной вероятности β приведен в таблице 2.

Таблица 2.

q \ β	0,6	0,8	0,9	0,99
10^{-9}	$0{,}9 \cdot 10^9$	$1{,}7 \cdot 10^9$	$2{,}3 \cdot 10^9$	$4{,}6 \cdot 10^9$

В таблице 2 показано количество успешных реализаций – n для $q = 10^{-9}$ и различных β.

Выше был рассмотрен вариант методик контроля вероятности выполнения заданных функций, включаемых в программы испытаний, при условии многократных подряд успешных реализаций требуемой функции.

В общем случае, когда при испытаниях допускаются реализации, в которых заданные функции не выполняются (неуспешные реализации), для формирования параметров плана испытаний (при заданных: вероятности выполнения требуемой функции $p = 1 - q$ и доверительной вероятности β) следует определить:

– количество необходимых реализаций (N);
– максимально допустимое количество неуспешных реализаций – приемочное число (r).

Численные значения этих параметров рассчитываются по формулам (2 и 3):

$$N = \frac{\chi^2_{1-\beta}(f)}{2q}, \tag{2}$$

где $\chi^2_{1-\beta}(f)$ – квантили χ^2 (хи-квадрат) распределения с f степенями свободы, табулированные в таблицах [2, 3];

$$r = \frac{f}{2} - 1. \tag{3}$$

(для расчета использовать только четные значения f).

Пример расчета количества необходимых реализаций (N) при максимально допустимом количестве неуспешных реализаций – приемочных чисел (r) представлен в таблице 3.

Таблица 3.

r	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N	22	39	53	67	80	93	105	118	130	142	154

В таблице 3 показано количество реализаций – N при q = 0,1 (p = 0,9) и β = 0,9 для различных r.

Изделие считается выдержавшим испытания, если при N реализациях наблюдалось не более r реализаций, в которых заданные функции не выполнялись (неуспешные реализации).

Литература

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей // М.: Физматгиз, 1962. – 564 с.
2. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений // М.: Физматгиз, 1969. – 511 с.
3. ГОСТ РВ 20.57.304-98 КСКК. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Общие технические требования. Методы контроля и испытаний. Методы оценки соответствия требованиям к надежности. Введ. с 01.07.1998 г.

Для заметок