

Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники»

Объект авторского права

УДК 623.746.4-519

**ЦУПРИК**  
**Сергей Викторович**

**АДАПТИВНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ОПОРНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В  
УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ЯРКОСТИ В КОРРЕЛЯЦИОННО-  
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ СОПРОВОЖДЕНИЯ НАЗЕМНЫХ  
ОБЪЕКТОВ**

**Автореферат**  
**диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук**  
**по специальности 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы**  
**и устройства телевидения**

Минск, 2024

Научная работа выполнена в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь»

Научный руководитель

**Солонар Андрей Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела фундаментальных и прикладных исследований открытого акционерного общества «КБ Радар» — управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»

Официальные оппоненты

**Козлов Сергей Вячеславович**, доктор технических наук, профессор кафедры информационных радиотехнологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

**Наумов Александр Олегович**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией СВЧ-электроники и радиотомографии Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси.

Оппонирующая организация

открытое акционерное общество «АГАТ – системы управления» – управляющая компания холдинга «Геоинформационные системы управления».

Защита состоится «16» мая 2024 г. в 14<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. +375-17-293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « 15 » 04 2024 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций  
кандидат технических наук, доцент



Т. А. Пулко

## ВВЕДЕНИЕ

Современные методы обработки изображений получили широкое применение при создании высокоточных систем наведения беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Особый интерес представляют корреляционно-экстремальные системы (КЭС), которые обеспечивают решение задач однократного внутрикадрового обнаружения, поиска, распознавания, а также последовательного межкадрового автоматического сопровождения неподвижных и движущихся наземных объектов на фоне поверхности земли. Принцип работы КЭС заключается в поиске максимума взаимной корреляционной функции (КФ) двух изображений – наблюдаемого объекта и опорного. В таких системах информация о наблюдаемых объектах формируется оптико-локационной системой (ОЛС) в виде последовательности кадров, а опорное изображение формируется оператором в момент выдачи целеуказания. Наличие сложного и неоднородного фона в совокупности с изоморфными преобразованиями текущего изображения объекта (изменения уровня яркости, масштаба, сдвига и поворота изображения относительно ориентации БЛА и помехами естественного и искусственного происхождения приводит к необходимости адаптивного формирования опорного изображения с учетом изменяющейся яркости в процессе наблюдения.

Простейшим способом адаптивного формирования опорного изображения является покадровая смена. Между тем непосредственное использование изображения объекта в качестве опорного неэффективно и приводит к его искажению, что способствует быстрому накоплению ошибок измерения координат и срыву сопровождения. В качестве решения предлагается использовать для оценки яркости в каждом пикселе измеритель, в основе которого лежит экспоненциальное сглаживание в виде альфа-бета фильтра. Однако экспоненциальное сглаживание не позволяет достичь приемлемой точности измерения яркости при наблюдении наземных объектов движущихся на сложном и неоднородном фоне ввиду того, что яркость в таких условиях может изменяться скачкообразно в случайные моменты времени.

Таким образом, диссертационная работа посвящена повышению эффективности функционирования корреляционно-экстремальных систем БЛА, путем увеличения времени устойчивого сопровождения наземных объектов, движущихся на сложном и неоднородном фоне за счет адаптивного формирования опорного изображения. Для этого в работе предложен способ, основанный на применении в каждом пикселе изображения объекта измерителя с экспоненциальным сглаживанием. Эффективность разработанного способа подтверждена результатами математического моделирования и полунатурных испытаний.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Тема диссертации включена в утвержденные планы научной работы учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» и соответствует Перечню перспективных направлений диссертационных исследований Вооруженных Сил Республики Беларусь в области анализа процессов обнаружения, распознавания (различения и классификации), разрешения сигналов (помех), измерения их параметров и разработки предложений по их оптимизации (п. 289). Содержание диссертационной работы соответствует Перечню приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2021–2025 гг. в области цифровых информационно-коммуникационных и междисциплинарных технологий, основанных на них производствах (п. 1), машиностроения, машиностроительных технологий, приборостроения и инновационных материалов (п. 4).

Результаты исследований, представленные в диссертации, могут быть использованы при разработке мультиспектральной оптико-электронной системы для разведывательных беспилотных летательных аппаратов; для обоснования тактико-технических требований к подсистеме оптико-электронной разведки модуля разведки системы противодействия малогабаритным беспилотным летательным аппаратам (НИР «Дербник-2022»); для улучшения показателей качества мониторинга наземной обстановки с помощью видеокамеры вокруг РЛС малой дальности.

### **Цель, задачи, объект и предмет исследования**

Цель – повышение эффективности сопровождения (времени устойчивого сопровождения) наземных объектов в корреляционно-экстремальных системах движущихся на сложном и неоднородном фоне.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проведен аналитический обзор публикаций, посвященных решению задачи автоматического сопровождения наземных объектов разведывательными беспилотными летательными аппаратами (БЛА) по их изображениям.

2. Рассмотрены математические модели яркости пикселей, применяемые для описания изображений, формируемых корреляционно-экстремальной системой. Проведены исследования статистических свойств яркости изображений наземных объектов, движущихся на сложном и неоднородном фоне.

3. Синтезировано устройство многогипотезного измерения яркости пикселя с межкадровой памятью гипотез для изображений наземных объектов, движущихся на сложном и неоднородном фоне, учитывающее случайное скачкообразное изменение значений яркости от кадра к кадру.

4. Методом математического моделирования проведен сопоставительный анализ способов адаптивного формирования опорного изображения с учетом изменяющейся яркости, основанного на применении синтезированного устройства многогипотезного измерения яркости пикселя с межкадровой памятью гипотез по сравнению с измерителем яркости пикселя, в основе которого лежит экспоненциальное сглаживание опорного изображения. Результаты моделирования подтверждены в ходе полунатурных испытаний.

Объект исследования – корреляционно-экстремальные системы сопровождения наземных объектов.

Предмет исследования – способы адаптивного формирования опорного изображения с учетом изменяющейся яркости пикселей изображений наземных объектов.

### **Научная новизна**

1. Способ описания яркости пикселей, изменяющейся от кадра к кадру, *основанный* на применении Марковской модели задающего воздействия с конечным числом состояний и непрерывным временем, *что позволяет* учесть скачкообразное изменение значений яркости в случайные моменты времени за счет описания анализируемых значений в пределах интервала стационарности полиномиальной моделью 0-го и 1-го порядка, тем самым получить выигрыш от 18 до 37 % по сравнению с полиномиальной моделью 1-го порядка.

2. Развитие метода статистического синтеза устройства многогипотезного измерения с межкадровой памятью гипотез, *основанного на* минимизации апостериорного риска ошибки измерения с учетом априорной неопределенности относительно модели изменения значений яркости от кадра к кадру, *что позволяет* улучшить показатели качества формируемых оценок.

3. Подход к адаптивному формированию опорного изображения, *отличающийся* формированием для каждого пикселя изображения объекта оценки яркости при помощи устройства многогипотезного измерителя с межкадровой памятью гипотез, *что позволяет* повысить коэффициент проводки при сопровождении наземных объектов, движущихся на сложном и неоднородном фоне.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Математическая модель изменения яркости пикселя от кадра к кадру, *отличающаяся* учетом скачкообразного перехода из одного интервала стационарности в другой в случайные моменты времени, согласно Марковской модели с конечным числом состояний, а также применением полиномиальных моделей 0-го и 1-го порядка при описании регулярной составляющей задающего воздействия яркости в пределах интервалов стационарности, *что позволило* повысить точность описания яркости пикселя

от кадра к кадру за счет уменьшения величины среднеквадратического отклонения яркости от регулярной части задающего воздействия в 1,2 – 1,5 раза по сравнению с моделью яркости пикселя, описанной полиномом задающего воздействием 1-го порядка и основанной на стационарности на всем интервале наблюдения.

2. Статистический синтез устройства многогипотезного измерения яркости пикселя с межкадровой памятью гипотез на основе критерия минимума апостериорного риска, *отличающийся* учетом априорной неопределенности относительно модели изменения регулярной составляющей задающего воздействия яркости пикселя, *что позволило* уменьшить величину суммарной ошибки (динамической и флуктуационной) измерения яркости в 1,53 – 3,11 раза по сравнению с измерителем яркости пикселя, в основе которого лежит экспоненциальное сглаживание на основе альфа-бета фильтра.

3. Усовершенствованный способ адаптивного формирования опорного изображения наблюдаемого объекта, движущегося на сложном и неоднородном фоне, *отличающийся* применением устройства многогипотезного измерения яркости с межкадровой памятью гипотез для оценки яркости каждого пикселя, *что позволило* повысить коэффициент проводки при сопровождении объектов корреляционно-экстремальным методом в 1,14 – 1,47 раза по сравнению с аналогичным способом адаптивного формирования опорного изображения, основанным на применении для оценки яркости в каждом пикселе измерителя с экспоненциальным сглаживанием.

### **Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации с ограничением их от соавторов совместных исследований и публикаций**

Соискатель лично:

1. Установил характер изменения яркости пикселей изображений наземных объектов, движущихся на сложном и неоднородном фоне, выраженный в случайном скачкообразном изменении значений яркости от кадра к кадру.

2. Синтезировал устройство многогипотезного измерения яркости пикселя с межкадровой памятью гипотез по критерию минимума апостериорного риска с учетом априорной неопределенности относительно модели изменения регулярной составляющей задающего воздействия яркости.

3. Усовершенствовал способ адаптивного формирования опорного изображения, основанный на применении для оценки яркости в каждом пикселе измерителя с экспоненциальным сглаживанием, за счет применения синтезированного устройства многогипотезного измерения яркости пикселя с межкадровой памятью гипотез.

4. Провел сопоставительный анализ способов адаптивного формирования опорного изображения и их влияния на эффективность сопровождения наземных объектов.

Основным соавтором публикаций является научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Солонар А.С., который определял цели, ставил задачи исследований, принимал участие в выборе методов исследований, планировании работ и обсуждении их результатов.

Совместно с Хмарским П.А. обсуждались результаты диссертационных исследований, а также разработан траекторный измеритель координат и параметров движения наземных объектов по данным бортовой оптико-локационной системы. Совместно с Р.А. Гуцевым, А.А. Арефьевым разработан комплекс моделирования и экспериментальных исследований для оценки показателей качества работы корреляционно-экстремальной системы сопровождения наземных объектов; совместно с А.С. Солонаром, А.А. Михалковским и В.С. Иванюк разработана структура оптико-локационного координатора, функционирующего в условиях сложной фоновой обстановки; совместно с Д.С. Нефёдовым, А.Д. Пузановым проведены полунатурные испытания, в ходе которых были получены видеозаписи наземных объектов, используемые для подтверждения результатов математического моделирования. Результаты, полученные соавторами публикаций, в диссертацию не вошли.

#### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: VII, VIII Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации» (г. Минск, 2017, 2018); «XI, XII, XIV Машеровские чтения» (г. Витебск, 2017, 2018, 2020); XX Республиканской научной конференции студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» (г. Гомель, 2017); XXV Международной научной конференции «ICINS» (г. Санкт-Петербург, 2018); II международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития авиации» (г. Минск, 2018); VIII Международной научной конференции по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (г. Минск, 2019); Международной военно-научной конференции «Проблемы обеспечения военной безопасности государства в современных условиях» (г. Минск, 2019); Научно-технической конференции «Информационные радиосистемы и радиотехнологии» (г. Минск, 2022); Республиканском научно-практическом семинаре «Актуальные вопросы развития систем, автоматизации, радиолокации, и приемо-передающих устройств»; Международной научной конференции «Военное образование и наука в условиях цифровой трансформации знаний».

Использование результатов диссертации подтверждено 2 справками о возможном практическом использовании.

### **Опубликование результатов диссертации**

По результатам выполненных исследований опубликовано 19 научных работ общим объемом 5,3 авторского листа. Из них 6 статей объемом 3,3 авторского листа в научных изданиях, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, 9 статей в сборниках материалов конференций объемом 1,7 авторского листа, 4 статей в сборниках тезисов докладов конференций объемом 0,3 авторского листа.

### **Структура и объем диссертации**

Работа состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, списка использованных источников, 5 приложений. Список использованных источников включает библиографический список из 104 наименований и список публикаций соискателя ученой степени из 19 наименований. Общий объем – 149 страниц, в том числе 36 рисунков на 17 страницах, 7 таблиц на 9 страницах, 5 приложений на 34 страницах.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

В **первой главе** диссертации проведен обзор, посвященный способам построения систем автоматического сопровождения наземных объектов, устанавливаемых на борту разведывательных БЛА. Из всех рассмотренных аппаратов особый интерес представляют БЛА с оптическими устройствами на гиросtabilизированных платформах. Использование гиросtabilизированных платформ с оптическими устройствами позволяет решить задачу автоматического сопровождения в условиях изменения ориентации БЛА и собственного движения наблюдаемых объектов. Такая система на борту БЛА называется оптико-локационным координатором (ОЛК), который функционирует в условиях сложной фоно-целевой обстановки, что существенно влияет на качество выдаваемой информации и точность самонаведения БЛА. Под сложной фоно-целевой обстановкой понимается: наличие одновременно нескольких похожих объектов в кадре (многоцелевая ситуация), геометрических искажений изображения и необходимость учета влияния нелинейных пересчетов и ошибок, вносимых датчиками ОЛК. В результате была предложена новая структура ОЛК, представленная на рисунке 1. Новая структура включает в себя ОЛС с видеодатчиком и блоком внутрикадровой обработки (ВКО), блок межкадровой обработки (МКО), блок выбора приоритетной цели, контур управления ОЛС, а также необходимые блоки пересчета.



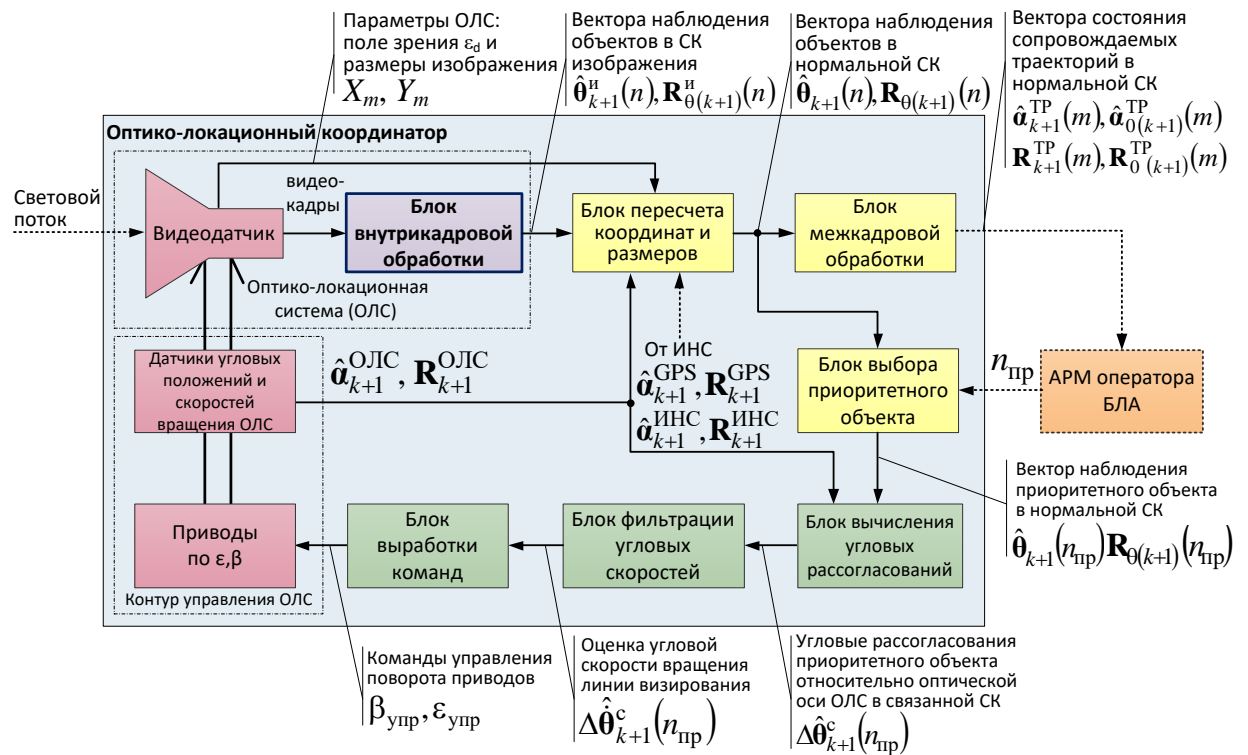


Рисунок 1 – Обобщенная структура ОЛК функционирующего в автоматическом режиме

ОЛК взаимодействует с автоматизированным рабочим местом оператора БЛА, блоком выработки команд и бортовым комплексом навигации и управления БЛА. Для обеспечения возможности функционирования ОЛК в условиях сложной фоно-целевой обстановки в его состав входят блок ВКО и устройство МКО. В блоке ВКО производятся процедуры линейного контрастирования, фильтрации и децимации изображений, а также реализуются этапы обнаружения, измерения координат, распознавания наблюдаемых объектов. В блоке МКО решается задача вторичной обработки информации, которая заключается в объединении во времени единичных решений о наличии или отсутствии объекта в кадре и его классе, что улучшает характеристики обнаружения, измерения и распознавания.

Обзор существующих методов выделения изображений объектов показал, что корреляционно-экстремальные методы обладают высокой помехоустойчивостью, низкой чувствительностью к уровню флуктуаций и размерам изображения наблюдаемого объекта. Оптико-локационные системы, в которых реализована корреляционно-экстремальная обработка, называются *корреляционно-экстремальными системами*, а повышение их эффективности может быть достигнуто двумя путями: за счет уменьшения влияния фоновой составляющей на точность определения координат объектов или адаптивного формирования опорного изображения с учетом изменяющейся яркости от кадра к кадру. Аналитический обзор литературы показал, что наиболее эффективным способом адаптивного формирования опорного изображения заключается в применении для каждого  $(i, j)$ -го

пикселя измерителя яркости, в основе которого лежит экспоненциальное сглаживание в виде альфа-бета фильтра. Способ позволяет отслеживать основные изменения в опорном изображении, такие как размеры, яркость и конфигурацию. Однако при наблюдении объектов движущихся на сложном и неоднородном фоне экспоненциальное сглаживание оказывается недостаточно эффективным ввиду того, что яркость может изменяться скачкообразно от кадра к кадру в случайные моменты времени, а математическая модель, лежащая в основе экспоненциального фильтра, не позволяет адекватно описать такой процесс.

Во **второй** главе рассмотрены математические модели яркости пикселей, используемые при разработке алгоритмов обработки изображений в КЭС. В виду случайного характера поступающей информации об изображениях наземных объектов, наиболее подходящей математической моделью считается модель случайного процесса вида:

$$\mathbf{f}_{(k+1)ij}^{(c)} = \mathbf{H}\mathbf{a}_{(k+1)ij}^{(c)} + \mathbf{w}_{(k+1)ij}^{(c)}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{f}_{(k+1)ij}^{(c)}$  – вектор наблюдаемых параметров с номером  $(ij)$  в цветовом канале  $(c)$ ,  $c = \{r = 1, g = 2, b = 3\}$ ;  $\mathbf{H}$  – статическая матрица пересчета вектора состояния  $\mathbf{a}_{(k+1)ij}^{(c)}$ ;  $\mathbf{a}_{(k+1)ij}^{(c)}$  – вектор состояния пиксел с номером  $(ij)$  на  $(k+1)$ -м кадре;  $\mathbf{w}_{(k+1)ij}^{(c)}$  – некоррелированные отсчеты флуктуаций яркости;

Проведенные исследования статистических свойств яркости изображений наземных объектов показали, что при наблюдении движущихся объектов на сложном и неоднородном фоне яркость изменяется скачкообразно в случайные моменты времени. Результаты проведенных исследований, показали, что 74% пикселей всех рассмотренных изображений являются нестационарными (рисунок 2, а), а длительности интервалов стационарности распределены по показательному закону (рисунок 2, б).

Результаты оценки динамической устойчивости яркости всех анализируемых пикселей



а

а – результаты оценки динамической устойчивости;

Распределение интервалов стационарности всех анализируемых пикселей



б

б – оценка распределения длительностей интервалов стационарности

Рисунок 2 – Результаты оценки динамической устойчивости яркостных срезов пикселей во времени

Полученные результаты позволили сделать вывод о возможности применения Марковской модели с конечным числом состояний и непрерывным временем. Такой подход называется *полумарковским* и активно применяется при построении моделей движения маневрирующих целей по данным радиолокационной информации:

$$\mathbf{a}_{(k+1)ij}^{(c)} = \mathbf{B}\mathbf{a}_{kij}^{(c)} + \mathbf{S}(\boldsymbol{\eta}_{(k+1)ij}^{(c)} + \boldsymbol{\mu}_{(k+1)ij}^{(c)}), \quad (2)$$

где  $\mathbf{B}$  – динамическая матрица пересчета вектора состояния с  $k$  на  $(k+1)$ -й кадр;  $\mathbf{S}$  – матрица линейного преобразования над отсчетами белого гаусовского шума;  $\boldsymbol{\eta}_{(k+1)ij}^{(c)}$  – отсчеты белого гаусовского шума для  $(i, j)$ -го пикселя;  $\boldsymbol{\mu}_{(k+1)ij}^{(c)}$  – детерминированное значение яркости  $(i, j)$ -го пикселя.

Значения яркости  $\boldsymbol{\mu}_{(k+1)ij}^{(c)}$  для глубины цвета 8 бит изменяются в диапазоне  $\boldsymbol{\mu}_{(k+1)ij}^{(c)} \in 0 \dots 255$  в случайные моменты времени, определяемые пуассоновским потоком событий. Ввиду априорной неопределенности относительно величины  $\boldsymbol{\mu}_{(k+1)ij}^{(c)}$ , можно считать равновероятным появление каждого из возможных значений  $\boldsymbol{\mu}_{(k+1)ij}^{(c)} \in 0 \dots 255$ , а ее распределение равномерным. Моменты времени между состояниями  $\boldsymbol{\mu}_{(k+1)ij}^{(c)}$  называются интервалами стационарности  $\Delta t_{\Pi(s+1)}$ , распределение которых описывается показательным законом.

Проверка адекватности математической модели (2) проводилась по изображениям реальных наземных объектов. Сравнивались распределения интервалов стационарности и анализировались автокорреляционные функции (АКФ), полученные по экспериментальным данным и в результате математического моделирования. Результаты проверки адекватности модели приведены на рисунке 3.

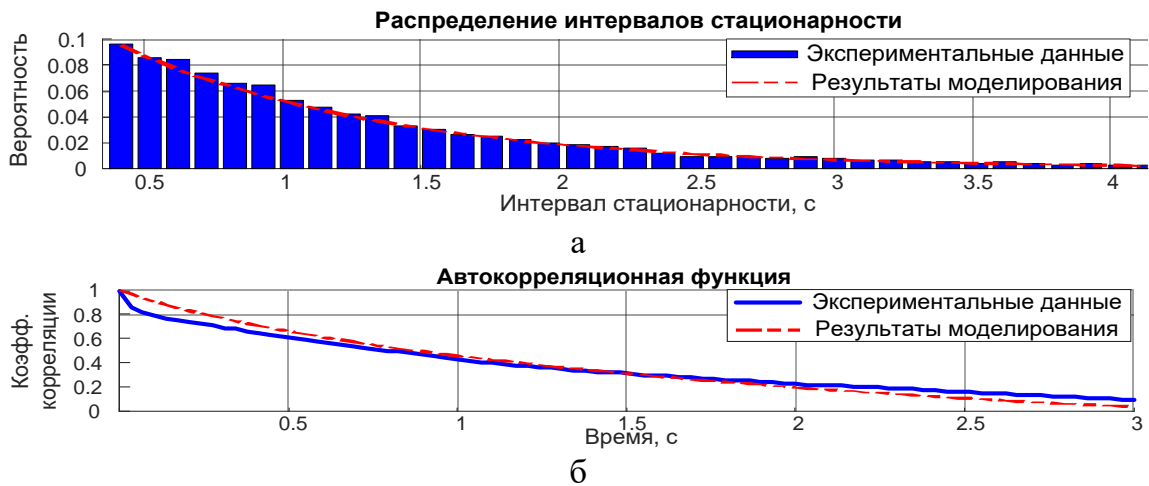


Рисунок 3 – Результаты сравнения распределений интервалов стационарности и анализа автокорреляционных функций методом математического моделирования и по экспериментальным данным

Распределение интервалов стационарности и АКФ, полученные по результатам моделирования с доверительной вероятностью не ниже 0,9 согласуются с экспериментальными (рисунок 3, а, б). Оценка точности описания закономерностей изменения яркости пикселя проводилась по результатам сравнительного анализа полумарковской модели (2) и моделей задающего воздействия 0-го и 1-го порядков. Показателем качества выбрана величина СКО яркости как корень квадратный из суммы квадратов отклонений яркости пикселя от оценки математического ожидания на интервале стационарности. Результаты сравнительного анализа показали, что выигрыш в значении СКО яркости при использовании полумарковской модели (2) в зависимости от условий наблюдения, по сравнению с Марковской моделью задающего воздействия, у которой регулярная составляющая представлена полиномиальной моделью 1-го порядка, составил от 18 до 37 % и в среднем 25 % или увеличился в **1,2 – 1,5 раза** и в среднем в 1,4 раза [3–А].

В **третьей главе** диссертации проведен статистический синтез устройства многогипотезного измерения яркости пикселя с межкадровой памятью гипотез. В качестве критерия синтеза устройства использовался минимум апостериорного риска измерения вектора состояния с квадратичной функции потерь. В соответствии с общей методикой статистического синтеза в условиях параметрической априорной неопределенности относительно модели входного воздействия  $\gamma_l$ ,  $l = \overline{1, N_\gamma}$  на  $(k + 1)$  кадре, конкретизированной для задач измерения, окончательное выражение для оценки вектора состояния  $\hat{\mathbf{a}}_{k+1}^{(c)}$  имеет вид:

$$\hat{\mathbf{a}}_{k+1}^{(c)} = \sum_{l=1}^{N_\gamma} p(\gamma_l | \mathbf{f}'_{k+1}^{(c)}) \hat{\mathbf{a}}_{k+1}^{(c)}(\gamma_l), \quad (3)$$

где  $\hat{\mathbf{a}}_{k+1}^{(c)}(\gamma_l)$  – условная оценка вектора состояния (условное математическое ожидание), вычисляемая в предположении справедливости гипотезы  $\gamma_l$ ;  $p(\gamma_l | \mathbf{f}'_{k+1}^{(c)})$  – апостериорная вероятность  $l$ -й гипотезы о модели изменения регулярной составляющей задающего воздействия яркости пикселя при условии принятия совокупности реализаций  $\mathbf{f}'_{k+1}^{(c)}$ .

Полученное выражение для оценки вектора состояния (3) является оптимальным и учитывает все модели изменения регулярной составляющей задающего воздействия яркости пикселя  $N_\gamma$ , которые могут возникнуть на  $(k + 1)$  кадре. Для возможности физической реализации такого измерителя, число гипотез о модели входного воздействия ограничено до трех ( $N_\gamma = 3$ ), что позволило перейти к квазиоптимальному устройству, структура которого приведена на рисунке 4. Такой измеритель называется многогипотезным

измерителем с межобзорной (межкадровой) памятью гипотез (МИМПГ), а в зарубежных публикациях IMM (Interactive Multiple Model).

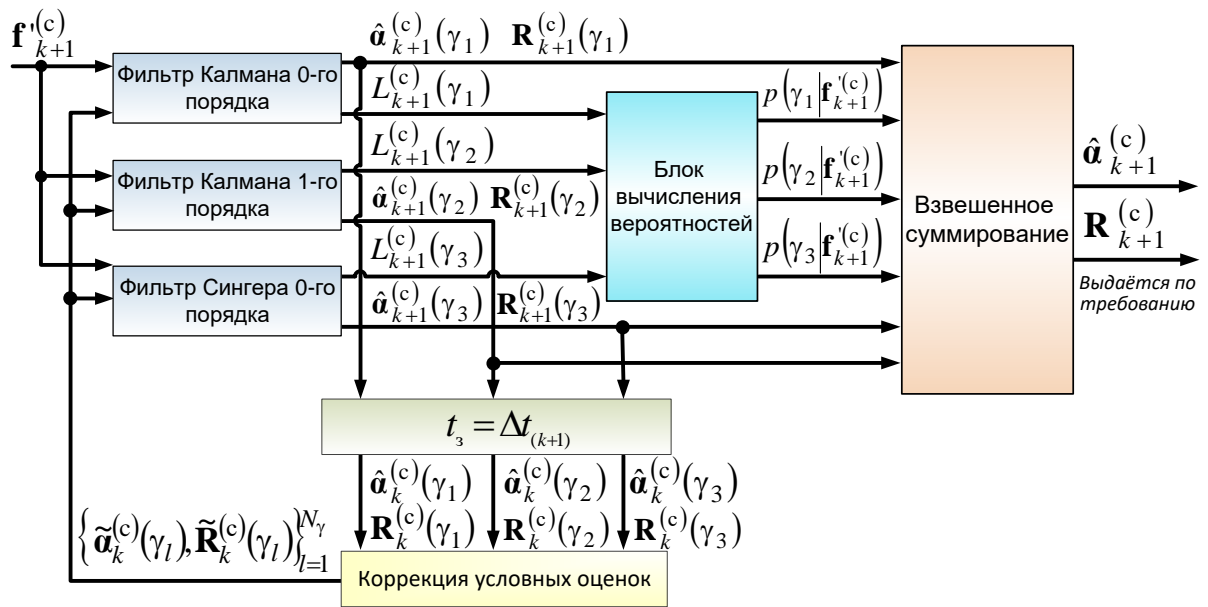


Рисунок 4 – Структурная схема устройства многогипотезного измерения яркости пикселя с межкадровой памятью гипотез

Структура полученного измерителя учитывает три гипотезы. Первая гипотеза  $\gamma_1$  заключается в том, что модель задающего воздействия представляет собой полиномиальную модель 0-го порядка, а вторая  $\gamma_2$  – модель 1-го порядка. Использование полиномиальных моделей 0-го и 1-го порядка в качестве гипотез о модели задающего воздействия обусловлено результатами исследований, представленных во второй главе диссертации. Для уменьшения влияния переходных процессов в состав МИМПГ дополнительно включается  $\gamma_3$  – фильтр Сингера 0-го порядка. Под каждую гипотезу о модели задающего воздействия в структуре МИМПГ применяется отдельный фильтр.

Проверка эффективности МИМПГ проведена путем оценки суммарной ошибки (динамической и флуктуационной) измерения яркости  $\Delta_\Sigma$  :

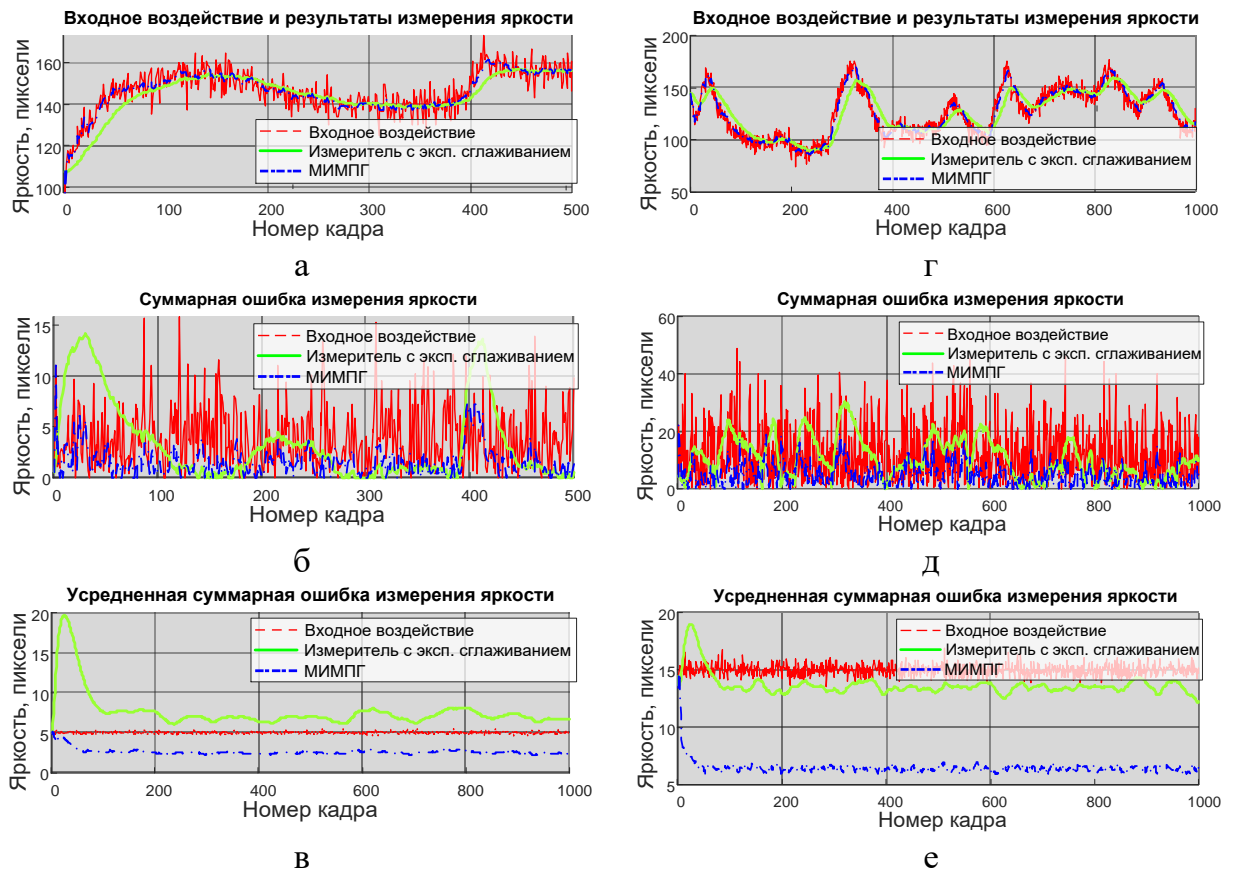
$$\Delta_n^{(cp)} = \frac{1}{N_{\text{эксп}} - 1} \sum_{n=1}^{N_{\text{эксп}}} \sqrt{(\tilde{\Theta}_n^{(c)} - \Theta_n^{(c)})^2}, \quad \Delta_\Sigma = \frac{1}{N_d} \sum_{n=1}^{N_d} \Delta_n^{(cp)}, \quad (4)$$

где  $\Theta_n^{(c)}$  – отсчет регулярной составляющей задающего воздействия (истинное значение);  $\Delta_n$  – величина отклонения результатов измерения яркости от истинного значения;  $\Delta_n^{(cp)}$  – усредненная величина отклонения  $\Delta_n$  по всем дискретным отсчетам  $n = 1 \dots N_d$ .

Параметрами входного воздействия являются интенсивность смены моделей задающего воздействия  $\lambda_\Pi$  и СКО возмущающего воздействия  $\sigma_w$ . Интенсивность  $\lambda_\Pi$  изменялась в пределах  $\lambda_\Pi = 0.1 \dots 0.9$ , а СКО  $\sigma_w = 5 \dots 15$ .

Интенсивность  $\lambda_{\Pi}$  влияет на частоту смены модели задающего воздействия, а СКО возмущающего воздействия  $\sigma_w$  характеризует общий уровень шума, на фоне которого наблюдается объект (шумы дискретизации, флуктуации пикселей).

В качестве примера на рисунке 5 приведены результаты фильтрации входного воздействия, полученного в результате математического моделирования с параметрами  $\lambda_{\Pi} = 0.1$  и  $\lambda_{\Pi} = 0.9$ ,  $\sigma_w = 5$ . На интервалах резкого изменения яркости наблюдается рост суммарной ошибки измерения, что хорошо видно на графиках 5, б, д. Это связано с ростом динамической ошибки, который наблюдается в большей степени у измерителя с экспоненциальным сглаживанием.



а – входное воздействие и результаты измерения для  $\lambda_{\Pi} = 0.1$ ,  $\sigma_w = 5$ ; б – суммарная ошибка измерения яркости; в – усредненная суммарная ошибка измерения яркости; г – входное воздействие и результаты измерения для  $\lambda_{\Pi} = 0.9$ ,  $\sigma_w = 5$ ; д – суммарная ошибка измерения яркости; е – усредненная суммарная ошибка измерения яркости

Рисунок 5 – Результаты математического моделирования для параметров входного воздействия  $\lambda_{\Pi} = 0.1$  и  $0.9$ ,  $\sigma_w = 5$

В результате при использовании МИМПГ суммарная ошибка измерения яркости (4) уменьшилась в **1,53 – 3,11** раза по сравнению с измерителем яркости пикселя, в основе которого лежит экспоненциальное сглаживание в виде альфа-бета фильтра.

В четвертой главе проведен сопоставительный анализ способов адаптивного формирования опорного изображения. Для сопоставления выбраны два способа – покадровая смена и экспоненциальное сглаживание. Сопоставление осуществлялось при помощи комплекса моделирования, разработанного на базе кроссплатформенного графического движка Unity3D (рисунок 6). Имитация движения наземных объектов в сцене по заданной траектории осуществляется в блоке моделирования наземных объектов, а полет БЛА – в блоке моделирования летательного аппарата. Блок моделирования камеры представляет собой отдельный элемент и определяет область в трехмерном пространстве, которая отображается в кадре. В результате с блока формирования изображения последовательно во времени поступают синтезированные кадры  $f_{k+1}^{(c)}$  и далее подаются в качестве входного воздействия на устройство корреляционно-экстремальной обработки.

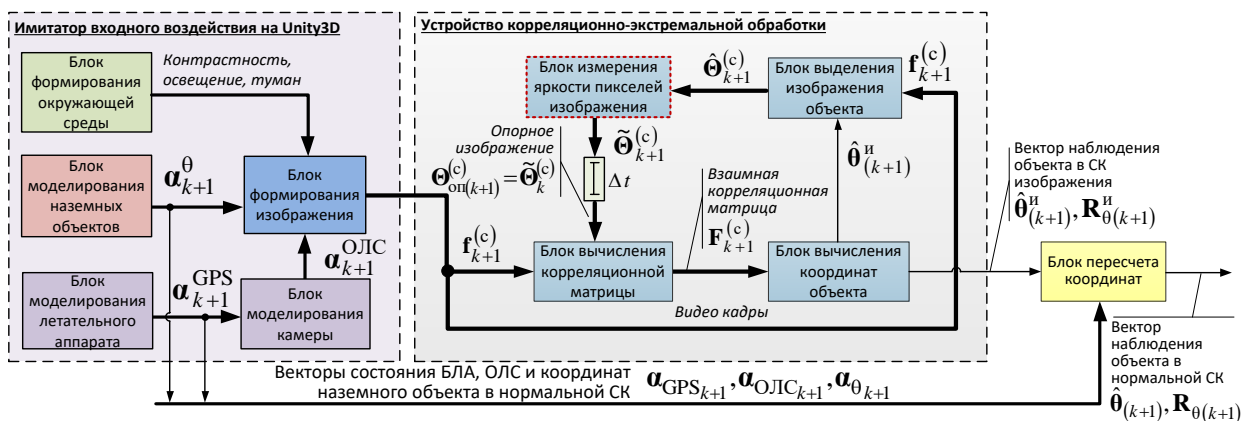


Рисунок 6 – Структурная схема комплекса моделирования на базе кроссплатформенного графического движка Unity3D

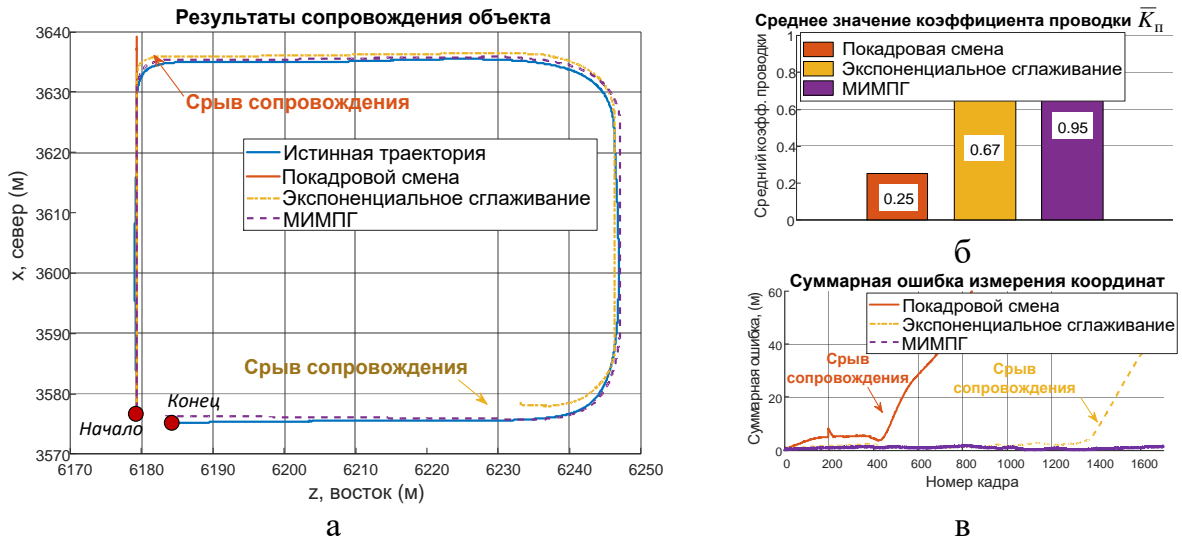
Для проведения математического моделирования сформированы типовые входные воздействия, на которых изображены автомобили, движущиеся на фоне дорожного покрытия. По каждому типовому воздействию проверялась эффективность сопровождения при помощи обобщенного системного показателя, определяемого экспериментально – коэффициента проводки  $K_{\Pi}$  и его среднего значения  $\bar{K}_{\Pi}$ :

$$K_{\Pi} = \frac{N_{\Sigma\theta}}{N_{\Sigma}}, \quad \bar{K}_{\Pi} = \frac{1}{N_{\text{эксп}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{эксп}}} K_{\Pi}(k), \quad (5)$$

где  $N_{\Sigma\theta}$  – суммарное число кадров устойчивого сопровождения наземного объекта;  $N_{\Sigma}$  – суммарное число кадров, в которых наблюдался наземный объект;  $N_{\text{эксп}}$  – общее число модельных экспериментов.

В качестве примера на рисунке 7 представлены результаты моделирования одного из типовых входных воздействий в виде прямолинейного движения с поворотами. Оценивалась устойчивость сопровождения при совершении маневра в виде поворота на  $90^{\circ}$ . Как видно из рисунка 7, а при покадровой смене опорного изображения срыв

сопровождения наступает на первом же повороте автомобиля, что свидетельствует о низкой эффективности данного способа при наличии маневра (рисунок 7, б). В данном случае срыв сопровождения вызван резким увеличением суммарной ошибки измерения координат (рисунок 7, в), из-за несоответствия изображений наблюдаемого объекта и его опорного изображения. При экспоненциальной фильтрации, по сравнению с покадровой сменой, время устойчивого сопровождения возрастает, но с увеличением времени наблюдения вероятность срыва остается достаточно высокой. Применение МИМПГ позволило устойчиво сопровождать объект для данного типового воздействия практически на всем интервале наблюдения.



а – результаты сопровождения наземного объекта; б – диаграмма средних значений коэффициента проводки; в – суммарная ошибка измерения координат

Рисунок 7 – Результаты математического моделирования для прямолинейного движения с поворотами

Сопоставительный анализ показал, что способ адаптивного формирования опорного изображения, основанный на применении МИМПГ, позволил добиться значений коэффициента проводки, вычисляемого согласно выражению (5) равных 0,94–0,98, что в **1,18–1,42** раза больше, чем для экспоненциального сглаживания.

Для подтверждения полученных результатов проведены полунатурные испытания с использованием видеозаписей, полученных при помощи БЛА DJI Phantom 4.В результате применения БЛА Phantom 4 были получены видеозаписи наземной фоно-целевой обстановки, на которых изображены легковые и грузовые автомобили. Для оценки показателей качества сопровождения последовательно на всех записях выделялись изображения тех объектов, чьи траектории движения соответствовали типовым входным воздействиями. В ходе полунатурных испытаний установлено, что использование МИМПГ позволяет повысить коэффициент проводки до 0,91–0,98, что в **1,14–1,47** раза больше, чем для способа экспоненциального сглаживания.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Проведен аналитический обзор публикаций, посвященных решению задачи автоматического сопровождения наземных объектов разведывательными БЛА. Отмечено, что одним из перспективных направлений исследований является повышение эффективности автоматического сопровождения наземных объектов в бортовых ОЛК за счет применения корреляционно-экстремальной обработки на этапе ВКО [1–А; 2–А; 6–А; 8–А–10–А; 17–А].

2. Рассмотрены способы повышения эффективности корреляционно-экстремальной обработки за счет адаптивного формирования опорных изображений объектов с учетом изменяющейся яркости от кадра к кадру [11–А; 12–А]. Наиболее эффективным способом адаптивного формирования опорных изображений является способ, основанный на применении измерителя с экспоненциальным сглаживанием. Однако проведенные исследования статистических свойств яркости изображений наземных объектов показали, что применение измерителя с экспоненциальным сглаживанием оказывается недостаточно эффективным ввиду того, что процесс изменения яркости носит нестационарный характер, выраженный в случайном скачкообразном ее изменении во времени [3–А; 14–А; 15–А].

3. Предложена математическая модель яркости пикселя [13–А; 18–А], основанная на применении Марковской модели с конечным числом состояний и непрерывным временем. Выигрыш при использовании такой модели в зависимости от условий наблюдения увеличился **в 1,2 – 1,5 раза** [3–А] по сравнению с моделью яркости пикселя, описанной полиномом задающего воздействием 1-го порядка и основанной на стационарности на всем интервале наблюдения.

4. Проведен статистический синтез устройства измерения яркости одного пикселя [19–А]. В качестве критерия синтеза использовался минимум апостериорного риска с квадратичной функции потерь. Синтез проводился в условиях априорной неопределенности относительно модели входного воздействия. Осуществлен переход к МИМПГ, при использовании которого удалось достичь уменьшения величины суммарной ошибки измерения яркости **в 1,53 – 3,11 раза** меньше по сравнению с измерителем яркости пикселя, в основе которого лежит экспоненциальное сглаживание на основе альфа-бета фильтра [4–А].

5. Усовершенствован способ адаптивного формирования опорного изображения, основанный на применении для оценки яркости в каждом пикселе измерителя с экспоненциальным сглаживанием, за счет использования МИМПГ для каждого пикселя изображения объекта. Оценка его эффективности проводилась по результатам сопоставительного анализа методом математического моделирования при помощи комплекса моделирования [7–А; 16–А]. Эффективность сопровождения оценивалась

при помощи коэффициента проводки  $K_{\Pi}$  и его среднего значения  $\bar{K}_{\Pi}$ . В результате математического моделирования установлено, что способ адаптивного формирования опорного изображения, основанный на применении МИМПГ, позволяет добиться значений коэффициента проводки 0,94–0,98, что в **1,18–1,42** раза больше, чем для экспоненциального сглаживания [5–А].

б. Полученные результаты подтверждены полунатурными испытаниями, в ходе которых установлено, что использование МИМПГ для адаптивного формирования опорного изображения позволяет повысить коэффициент проводки до 0,91–0,98, что в **1,14–1,47** раза больше, чем для экспоненциального сглаживания [5–А].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Представленные в работе результаты исследований статистических свойств яркости пикселей изображений наземных объектов, позволили применить Марковскую модель с конечным числом состояний и непрерывным временем, тем самым позволив учесть скачкообразное изменение яркости пикселей во времени при наблюдении наземных объектов на сложном и неоднородном фоне.

Предложенная в работе модель яркости может быть использована для синтеза устройства межкадрового измерения ее значений для одного пикселя изображений воздушных объектов, наблюдаемых на фоне облаков различной структуры, в задачах реконструкции динамических изображений используемых в медицине, охране окружающей среды и других.

Применение синтезированного устройства межкадрового измерения яркости позволило повысить качество формируемых опорных изображений для наземных объектов, тем самым повысив коэффициент проводки в корреляционно-экстремальных системах сопровождения на этапе внутрикадровой обработки, что в свою очередь повышает эффективность межкадровой обработки при автоматическом сопровождении наземных объектов разведывательными БЛА.

Дальнейшее развитие тематики диссертационной работы может заключаться в синтезе устройств межкадрового измерения размеров наблюдаемых объектов и формировании опорных изображений, адаптивных к изменяющимся размерам объектов в процессе наблюдения.

Полученные результаты диссертационных исследований подтверждены: справкой о возможном практическом использовании при разработке мультиспектральной оптико-электронной системы для разведывательных беспилотных летательных аппаратов в УО «ВАРБ»; справкой о возможном практическом использовании для улучшения показателей качества мониторинга наземной обстановки с помощью видеокамеры вокруг РЛС малой дальности в ОАО «КБ Радар».

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий**

1–А. Оптико-локационный координатор системы самонаведения беспилотного летательного аппарата / А. С. Солонар, П. А. Хмарский, А. А. Михалковский, С. В. Цуприк, В. С. Иванюк // Докл. БГУИР. – 2018. – № 3. – С. 19–25.

2–А. Методика расчета ошибок разового оценивания местоположения наблюдаемых объектов в бортовых оптико-локационных системах / А. С. Солонар, П. А. Хмарский, А. А. Михалковский, С. В. Цуприк // Докл. БГУИР. – 2018. – № 2. – С. 26–32.

3–А. Солонар, А. С. Полумарковская модель изменения яркости изображения наземного объекта, формируемого оптико-локационной системой / А.С. Солонар, С.В. Цуприк, П.А. Хмарский // Вест. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2023. – № 1. – С. 97–107.

4–А. Солонар, А. С. Применение многогипотезного измерителя для адаптации опорного изображения к изменяющейся яркости изображения наземного объекта / А. С. Солонар, С. В. Цуприк, П. А. Хмарский // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2023. – № 3. – С. 71–78.

5–А. Солонар, А. С. Влияние способа формирования опорного изображения на эффективность бортовой корреляционно-экстремальной системы сопровождения наземных объектов / А. С. Солонар, С. В. Цуприк, П. А. Хмарский // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук – 2023. – Т. 68, № 2. – С. 167–176.

6–А. Солонар, А.С. Траекторный измеритель координат и параметров движения наземных объектов по данным бортовой оптико-локационной системы / А.С. Солонар, П.А. Хмарский, С.В. Цуприк // Гироскопия и навигация – 2023. Т.31, №3(122). – С. 91–108.

### **Статьи в сборниках материалов научных конференций**

7–А. Цуприк, С. В. Особенности формирования входного воздействия для оптико-локационной системы с помощью графического интерфейса OpenGL и Unity3D [Электронный ресурс] / С. В. Цуприк, А. С. Солонар // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы XX Респ. науч. конф. студентов и аспирантов, Гомель, 20–22 марта 2017 г. : в 2 ч. / Гомел. гос. ун-т ; редкол.: О. М. Демиденко (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2017. – Ч. 1. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

8–А. Цуприк, С. В. Обобщенная структура оптико-локационного координатора воздушного базирования для беспилотного летательного аппарата / С. В. Цуприк, А. С. Солонар // XI Машеровские чтения : материалы меж-

дунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Витебск, 18 окт. 2017 г. / Витеб. гос. ун-т ; редкол.: И. М. Прищепа (гл. ред.) [и др.]. – Витебск, 2017. – С. 37–38.

9–А. Features of trajectory measurement coordinates and parameters of movement of ground objects in on-board optical-location systems / A. S. Solonar, P.A. Khmarskiy, A.A. Mihalkovskiy, S.V. Tsuprik // 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 28–30 May 2018. – St. Petersburg, Russia, 2018. – P. 1–5.

10–А.Цуприк, С. В. Корреляционный способ обнаружения изображения объекта и измерение его координат с адаптивным формированием эталонного изображения / С. В. Цуприк, А. С. Солонар, П. А. Хмарский // Актуальные проблемы и перспективы развития авиации : сб. материалов II междунар. науч.-практ. конф. Белорус. гос. акад. авиации, Минск, 25–26 апр. 2018 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. акад. авиации ; сост.: А. В. Дубовский [и др.] ; под науч. ред. Г. Ф. Ловшенко. – Минск, 2018. – Ч. 1. – С. 105–112.

11–А.Цуприк, С.В. Адаптация к геометрическим преобразованиям эталонных изображений объектов на потоке видеоданных для корреляционных методов обнаружения-измерения / С.В.Цуприк, А.С.Солонар // Материалы международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "XII Машеровские чтения", Витебск, ВГУ имени П.М. Машерова, 19 октября 2018г. - Витебск, 2018. – С. 29–31.

12–А.Цуприк, С. В. Способ формирования эталонных изображений объектов, адаптивных к изменяющимся условиям наблюдения для корреляционных методов обнаружения-измерения / С. В. Цуприк, А. С. Солонар // 8-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения : сб. науч. ст., Минск, 16–17 мая 2019 г. : в 5 ч. / Гос. воен.-пром. ком. Респ. Беларусь. – Минск, 2019. – Ч. 2. – С. 106–108.

13–А.Цуприк, С. В. Математическая модель изображения в виде нестационарного коррелированного во времени случайного процесса / С. В. Цуприк, А. С. Солонар // XIV Машеровские чтения : материалы междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Витебск, 21 окт. 2020 г. / Витеб. гос. ун-т ; редкол.: Е. Я. Аршанский (гл. ред.) [и др.]. – Витебск, 2020. – С. 60–61.

14–А.Цуприк, С. В. Методика исследования статистических свойств яркости пикселей изображений оптико-локационной системы беспилотного летательного аппарата / С. В. Цуприк, А. С. Солонар // Информационные радиосистемы и радиотехнологии : материалы науч.-техн. конф., Минск, 29–30 нояб. 2022 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2022. – С. 193–197.

15–А.Цуприк, С. В. Исследование статистических свойств яркости изображений формируемых оптико-локационной системы беспилотного летательного аппарата / С. В. Цуприк, А. С. Солонар // Актуальные вопросы развития систем автоматизации, радиолокации и приемо-передающих устройств : материалы Респ. науч.-практ. семинара каф. автоматизации, радиолокации

и приемо-передающих устройств Воен. акад. Респ. Беларусь, Минск, 30 нояб. 2022 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2022. – С. 35–37.

### **Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций**

16–А.Цуприк, С. В. Особенности формирования входного воздействия для оптико-локационных систем с помощью графического интерфейса Unity3D / С. В. Цуприк, А. С. Солонар, А. А. Арефьев // Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации : тез. докл. VII Междунар. науч.-практ. конф. авиац. фак. Воен. акад. Респ. Беларусь, Минск, 18–19 мая 2017 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2018. – С. 93.

17–А.Корреляционный метод обнаружения-измерения координат и параметров объектов с адаптивным формированием эталонного изображения / С. В. Цуприк [и др.] // Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации : тез. докл. VIII Междунар. науч.-практ. конф. авиац. фак. Воен. акад. Респ. Беларусь, Минск, 17–18 мая 2018 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2018. – С. 150.

18–А.Цуприк, С. В. Математическая модель изображения, формируемого оптико-локационной системой беспилотного летательного аппарата / С. В. Цуприк, А. С. Солонар // Военное образование и наука в условиях цифровой трансформации знаний : тез. докл. Междунар. науч. конф. Воен. акад. Респ. Беларусь, Минск, 20–21 апр. 2022 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2022. – С. 411.

19–А.Solonar, A.S. Statistical properties of image pixel brightness from the onboard optical system / A.S. Solonar, S.V. Tsuprik, P.A. Khmarskiy // 7<sup>th</sup> Advanced Engineering Days (AED), 1–2 July, 2023. – Mersin, Türkiye, 2023. – P.172–174.



## РЭЗІЮМЭ

Цупрык Сяргей Віктаравіч

### **Адаптыўнае фарміраванне апорнага малюнка ва ўмовах зменлівай яркасці ў карэляцыйна-экстрэмальных сістэмах суправаджэння наземных аб'ектаў**

**Ключавыя словы:** карэляцыйна-экстрэмальная сістэма суправаджэння, апорны малюнак, паўмаркаўская мадэль яркасці, фільтр Калмана, шматгіпотэзны вымяральнік з міжкадравай памяццю гіпотэз, беспілотны лятальны апарат.

**Мэта працы:** павышэнне эфектыўнасці суправаджэння (часу ўстойлівага суправаджэння) наземных аб'ектаў у карэляцыйна-экстрэмальных сістэмах якія рухаюцца на складаным і неаднародным фоне.

**Метады даследавання і выкарыстоўваная апаратура:** метады матэматычнага мадэлявання і паўнатурнага эксперыменту.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** праведзены аналітычны агляд публікацый, прысвечаных вырашэнню задачы аўтаматычнага суправаджэння наземных аб'ектаў па іх малюнкам, а таксама аналіз матэматычных мадэляў, якія апісваюць змяненне яркасці ў кожным пікселі. Пазначаная праблема рэалізацыі аўтаматычнага рэжыму суправаджэння, якая звязана з нізкай якасцю вылучэння малюнкаў аб'ектаў, якія рухаюцца на складаным і неаднародным фоне. Для аўтаматызацыі працэсу суправаджэння прапануецца карэляцыйна-экстрэмальны метады. Фарміраванне апорнага малюнка прапануецца ажыццяўляць шляхам ацэнкі яркасці ў кожным пікселі малюнка назіранага аб'екта. Выраблены статыстычны сінтэз квазіаптымальнага прыстасавання міжкадравага вымярэння яркасці, рэалізаванага па схеме мнагагіпотэзнага вымяральніка з міжкадравай памяццю гіпотэз. У склад мнагагіпотэзнага вымяральніка ўключаны фільтры Калман 0-га і 1-га парадку а так сама фільтр Сінгэр 0-га парадку. Пераход да мнагагіпотэзнага вымяральніка ажыццяўляецца дзякуючы полумаркаўскай мадэлі, прапанаванай для апісання яркасці пікселяў малюнкаў наземных аб'ектаў, якія рухаюцца на складаным і неаднародным фоне.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** вынікі мэтазгодна выкарыстоўваць пры распрацоўцы алгарытмаў аўтаматычнага суправаджэння аб'ектаў на малюнках, а гэтак жа пры выкананні навукова-даследчых і доследна-канструктарскіх работ ва ўстановах, якія займаюцца распрацоўкай і оптыка-лакацыйных сістэм, а таксама пры падрыхтоўцы інжынераў адпаведнага профілю.

**Вобласць ужывання:** бартавыя оптыка-лакацыйныя сістэмы для разведвальных беспілотных лятальных апаратаў.

## РЕЗЮМЕ

Цуприк Сергей Викторович

### **Адаптивное формирование опорного изображения в условиях изменяющейся яркости в корреляционно-экстремальных системах сопровождения наземных объектов**

**Ключевые слова:** корреляционно-экстремальная система сопровождения, опорное изображение, полумарковская модель яркости, фильтр Калмана, многогипотезный измеритель с межкадровой памятью гипотез, беспилотный летательный аппарат

**Цель работы:** повышение эффективности сопровождения (времени устойчивого сопровождения) наземных объектов в корреляционно-экстремальных системах движущихся на сложном и неоднородном фоне.

**Методы исследования и используемая аппаратура:** методы математического моделирования и полунатурного эксперимента.

**Полученные результаты и их новизна:** проведен аналитический обзор публикаций, посвященных решению задачи автоматического сопровождения наземных объектов по их изображениям, а также анализ математических моделей, описывающих изменение яркости в каждом пикселе. Обозначена проблема реализации автоматического режима сопровождения, связанная с низким качеством выделения изображений объектов, движущихся на сложном и неоднородном фоне. Для автоматизации процесса сопровождения предлагается корреляционно-экстремальный метод. Формирование опорного изображения предлагается осуществлять путем оценки яркости в каждом пикселе изображения наблюдаемого объекта. Произведен статистический синтез квазиоптимального устройства межкадрового измерения яркости, реализованного по схеме многогипотезного измерителя с межкадровой памятью гипотез. В состав многогипотезного измерителя включены фильтры Калмана 0-го и 1-го порядка и фильтр Сингера 0-го порядка. Переход к многогипотезному измерителю осуществлен благодаря полумарковской модели, предложенной для описания яркости пикселей изображений наземных объектов, движущихся на сложном и неоднородном фоне.

**Рекомендации по использованию:** результаты целесообразно использовать при разработке алгоритмов автоматического сопровождения объектов на изображениях, при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в учреждениях, занимающихся разработкой и оптико-локационных систем, а также при подготовке инженеров соответствующего профиля.

**Область применения:** бортовые оптико-локационные системы для разведывательных беспилотных летательных аппаратов.

## SUMMARY

Tsuprik Sergei Viktorovich

### **Adaptive formation of a reference image under conditions of varying brightness in correlation-extreme tracking systems for ground objects**

**Keywords:** correlation-extremal tracking system, reference image, semi-Markov model of brightness, Kalman filter, Interactive Multiple Model, unmanned aerial vehicle

**Purpose of the work:** improving the efficiency of tracking (time of sustained tracking) of ground objects in correlation-extreme systems moving against a complex and heterogeneous background

**Research methods and equipment used:** methods of mathematical modeling and semi-natural experiment.

**The results obtained and their novelty:** an analytical review of publications devoted to solving the problem of automatic tracking of ground objects by their images, as well as an analysis of mathematical models describing the brightness change in each pixel, is carried out. The problem of implementing the automatic tracking mode is identified, associated with the low quality of highlighting images of objects moving against a complex and heterogeneous background. A correlation-extreme method is proposed to automate the maintenance process. It is proposed to form a reference image by estimating the brightness in each pixel of the image of the observed object. A statistical synthesis of a quasi-optimal device for inter-frame brightness measurement, implemented according to the scheme of a multi-hypothesis meter with inter-frame hypothesis memory, has been performed. The multihypothesis meter includes Kalman filters of the 0th and 1st order and Singer filter of the 0th order. The transition to a multi-hypothesis meter was carried out thanks to the semi-Markov model proposed to describe the pixel brightness of images of ground objects moving against a complex and heterogeneous background.

**Recommendations for use:** The results should be used in the development of algorithms for automatic tracking of objects in images, as well as in the implementation of research and development work in institutions involved in the development and optical-location systems, as well as in the training of engineers of the corresponding profile.

**Scope:** onboard optical location systems for reconnaissance unmanned aerial vehicles.



*Научное издание*

**Цуприк  
Сергей Викторович**

**АДАПТИВНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ОПОРНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В  
УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ЯРКОСТИ В КОРРЕЛЯЦИОННО-  
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ СОПРОВОЖДЕНИЯ НАЗЕМНЫХ  
ОБЪЕКТОВ**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы и  
устройства телевидения**

Подписано в печать 04.04.2024. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Опечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч. изд. л. 1,4. Тираж 60 экз. Заказ 29.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск.