

На правах рукописи



МАРТЕМЬЯНОВ
Борис Викторович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ
ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Специальность 05.11.16 - Информационно-измерительные и управляющие
системы (технические системы)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Самара – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» (СамГТУ).

Научный консультант

доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика»

КУЗНЕЦОВ

Павел Константинович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиотехника» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»

ТАШЛИНСКИЙ

Александр Григорьевич

доктор технических наук, профессор, директор НИИ «Фотон» ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

ЕРЕМЕЕВ

Виктор Владимирович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Суперкомпьютеры и общая информатика» ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

ФУРСОВ

Владимир Алексеевич

Ведущая организация: ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем».

Защита состоится 26 декабря 2019 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д212.217.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», по адресу: г. Самара, ул. Галактионовская, 141, аудитория 33.

Отзывы на автореферат просим высылать по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, на имя учёного секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета по адресу: ул. Первомайская, 18.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.217.07
д.т.н., профессор



Абакумов А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Диссертация посвящена исследованиям динамически меняющихся двумерных изображений, получаемых проективным преобразованием яркостного поля, создаваемого движущимся в пространстве яркостным объектом. Рассматриваемые яркостные объекты характеризуются собственным или отраженным электромагнитным излучением в видимом или инфракрасном диапазонах. Результатом исследования является методология построения информационно-измерительных систем (ИИС) идентификации параметров движения изображений (ИПДИ). Методология включает в себя новые, ориентированные на реализацию в реальном времени, методы и алгоритмы высокоточного определения параметров движения (скоростей, смещений) элементов изображения.

Исследуемые изображения представляются в виде функции распределения освещенности (ФРО) фокальной плоскости (ФП) изобразительной системы (ИС). В современных системах наблюдения ФРО ФП преобразуется оптико-электронными преобразователями (ОЭП) в электронную форму и регистрируется на физических носителях в виде структурированных по времени и пространственным координатам наборов видеоданных (кадров видеоданных).

Методы и ИИС идентификации движения изображений находят широкое применение при создании высокоточных средств наведения и целеуказания, средств контроля и управления автономными мобильными платформами, транспортными потоками, в охранных системах, при создании программных средств анимации, создания добавленной реальности, построения стереоизображений, создания моделей наблюдаемых 3-D сцен и в других приложениях.

Широта круга приложений объясняется тем, что последовательность динамически меняющихся кадров изображений фиксирует пространственно-временные изменения яркостного поля, вызванные движением наблюдаемого яркостного поля, и поэтому содержит богатую информацию об объектах, создающих это поле. Основным приемом выявления таких изменений, используемым в современных технологиях обработки изображений, является вычисление векторного поля скоростей движения фрагментов изображения. Это векторное поле носит название «оптический поток» (optical flow). При обработке цифровых видеоданных фактически вычисляют оценки векторного поля относительного смещения фрагментов изображения в кадрах анализируемого динамического изображения. Термин оптический поток распространяют и на векторное поле таких смещений. В российской специальной литературе термин оптический поток часто заменяют термином «карта диспарантности» последовательности изображений. Далее эти понятия считаются эквивалентными.

Задача высокоточного восстановления оптического потока является фундаментальной проблемой в области создания ИИС контроля параметров движения объектов, наблюдаемых в видимом и инфракрасном диапазонах спектра электромагнитного излучения.

Объектом исследования является динамически меняющееся двумерное изображение, получаемых проективным преобразованием яркостного поля, создаваемое движущимся в пространстве яркостным объектом.

Предметом исследования является методология построения информационно-измерительной системы идентификации параметров движения изображений, создаваемых изобразительной системой при наблюдении движущегося в пространстве яркостного объекта.

Степень разработанности темы исследования

При анализе цифровых изображений проблема получения оценок параметров оптического потока сводится к совмещению изображений анализируемой кадровой последовательности видеоданных. В настоящее время существуют две основные группы методов совмещения изображений. Первую группу образуют взаимно-корреляционные методы, основанные на вычислении и поиске глобального экстремума взаимно-корреляционной функции (ВКФ) совмещаемых фрагментов изображений. Вторую группу образуют так называемые разностные методы, которые основаны на анализе временных и пространственных производных ФРО изображений. Эти методы часто называют «градиентными методами».

Разнообразные методы совмещения изображений разрабатывались, в частности, в работах В.В. Еремеева, В.К. Злобина, М.Н. Красильщикова, Г.Г. Себрякова, А.Г. Ташлинского, В.А. Фурсова, Стрельникова К.Н., Солдатов С.А. и многих других российских и зарубежных исследователей. Достаточно полные обзоры методов совмещения изображений даны в работах С. Бэйкера (Baker, S.), Б. Лукаса (Lucas, B.) и Т. Канейды (Kanade, T.).

Известны как достоинства, так и недостатки ВКФ методов. Основным достоинством их является слабая чувствительность к шумам видеоданных, а к недостаткам относятся: высокая вычислительная сложность, вызванная использованием поисковых процедур при вычислении экстремума ВКФ, чувствительность к морфологическим изменениям сравниваемых изображений, а также к локальным экстремумам ВКФ, на которых метод может «зависать» и приводить к недостоверным совмещениям. Необходимость преодоления указанных недостатков приводит к существенному усложнению алгоритмов совмещения и создает значительные проблемы при создании систем, работающих в реальном времени.

Методы второй группы отличаются высоким быстродействием. Очевидным их недостатком является необходимость использования операции вычисления пространственных и временных производных зашумленных

цифровых изображений. Как правило, эта операция осуществляется переходом к конечным приращениям, что существенно снижает точность и ухудшает сходимость алгоритмов совмещения, в особенности, в окрестности разрывов и изломов ФРО изображения. В связи с чем прибегают к предварительному сглаживанию обрабатываемых изображений, что приводит к потере мелких, подчас очень важных, деталей, например, окклюзий. Недостатком является и невозможность, без использования специальных «пирамидальных» процедур пересчета пиксельной сетки изображений, совмещать изображения, начальное смещение которых достаточно велико (более нескольких пикселей). Вызовом для исследователей является и то, что до сих пор не преодолены существенные трудности, возникающие при совмещении морфологически, яркостно и спектрально искаженных изображений.

Известны работы П.К. Кузнецова, В.И. Семавина, А.М. Абакумова, в которых предложена методика преодоления отмеченных недостатков. Методика названа методом функционализации параметров изображения (далее, для краткости, методом функционализации). Основной новацией в этих работах является переход от совмещения самих изображений к совмещению полей значений линейного функционала вида [4], определяемого на анализируемых изображениях. Функция веса такого функционала (основного функционала метода) задается как финитная функция, имеющая вид пирамиды. При таком выборе основной функционал приобретает все свойства обобщенной функции (ОФ). То есть осуществляется переход к обработке динамических изображений в сопряженном пространстве, отображение в которое задается основным функционалом. Использование сопряженного пространства позволяет корректно проводить анализ поведения на изображениях самого функционала и его производных по времени и пространству. Операция дифференцирования ОФ изображения по пространственным координатам реализуется дифференцированием функции веса ОФ, вид которой можно задавать по условию наименьшей сложности вычисления ее производных.

В диссертационной работе предлагается обобщение метода функционализации для решения задачи параметрической идентификации движения изображений (восстановления оптического потока) яркостных объектов по группе двумерных изображений, представленных разнородными видеоданными, отличающийся значительно более высокой точностью и быстродействием по сравнению с известными методами, а также робастностью к радиометрическим, спектральным и морфологическим искажениям изображений. Представлены варианты построения ИИС ИПДИ, реализующие метод функционализации, для решения прикладных задач в области обработки аэрокосмических изображений.

Цель диссертационной работы состоит в разработке принципов и путей повышении точности и быстродействия ИИС идентификации параметров движения изображений (восстановления оптического потока) яркостных объектов по группе двумерных изображений, представленных разнородными

видеоданными, и разработке на этой основе высокоточных ИИС идентификации параметров движения изображений для решения широкого круга прикладных задач, включающих информационное обеспечение пассивных систем навигации и ориентирования беспилотных мобильных платформ.

Основные задачи диссертации

Для достижения цели диссертации с необходимостью поставлены следующие задачи.

1. Получить общего вида соотношения (уравнения оптического потока (далее, ОП уравнения)), устанавливающего связь параметров оптического потока и измеримых характеристик динамического изображения.
2. Разработать метод вычисления относительного смещения изображений в кадрах группы разнородных видеоданных, полученных для одной и той же сцены при различном ракурсе съемки, с различной яркостью и контрастом, а также в различных спектральных диапазонах.
3. Разработать процедуру высокоточного совмещения изображений и способов построения карт диспарантности разнородных видеоданных, ориентированных на реализацию в системах реального времени.
4. Разработать универсальную методику оценки погрешности совмещения разнородных изображений.
5. Исследовать динамические свойства предложенной процедуры совмещения разнородных изображений.
6. Разработать частные методики построения ИИС ИПДИ для решения актуальных прикладных задач параметрической идентификации движения изображений, ориентированных на реализацию в системах реального времени.

Научная новизна

1. Предложена обобщенная математическая модель динамического изображения, связывающая перемещение изображения с векторным полем скоростей движения изображения (оптическим потоком), заданным на фокальной плоскости изобразительной системы автономной мобильной платформы. Модель отличается от известных моделей, основанных на предположении о постоянстве яркости фрагментов изображения при движении, тем, что допускает вариацию яркости во времени, а также сингулярности в оптическом потоке типа разрывов первого рода и отсутствия движения.
2. Получено обобщенное уравнение оптического потока, которое для оптического потока устанавливает связь параметров движения с измеримыми характеристиками изображений: характеристиками, вычисляемыми на подобластях изображения ненулевой площади, что отличает предложенный метод от известных «градиентных» методов.
3. Впервые предложена методика вычисления измеримых характеристик изображений на основе конструкции нормированных нелинейных обобщенных функций (основных функционалов метода функционализации) со сложным

составным ядром. Методика, в отличие от известных вариантов градиентного метода совмещения изображений, позволяет совмещать разнородные изображения, различающиеся ракурсом, спектральным диапазоном, яркостью, контрастом.

4. Разработана методика высокоточного совмещения изображений и построения соответствующих карт диспарантности, реализующая компенсационный метод совмещения изображений и обеспечивающая несмещенные оценки вектора оптического потока с недостижимой ранее субпиксельной точностью. Методика применима к фрагментам разнородных изображений, в том числе, изображений, глобальный экстремум автокорреляционной функции которых нечетко выражен.

5. Разработана универсальная методика оценки погрешности совмещения разнородных изображений, инвариантная классу совмещаемых изображений и имеющая, в отличие от известных оценок скалярной формы, форму двухкомпонентного вектора, характеризующего значение модуля ошибки совмещения изображений по координатам координатной системы, в которой представлены изображения. Методика содержит универсальный критерий останова итерационной процедуры совмещения изображений, с высокой достоверностью отсеивающий ложные совмещения изображений с линейными и изображений, глобальный экстремум автокорреляционной функции которых нечетко выражен.

6. Разработаны частные методики построения информационно-измерительной системы для решения актуальных прикладных задач параметрической идентификации движения изображений, поставленных и решенных впервые в практике космической съемки, ориентированные на реализацию в системах реального времени.

7. Разработана методика обработки изображений, на основе которой получены оценки частоты и амплитуды колебаний и вибраций фокальной плоскости изобразительной системы космических аппаратов наблюдения (КАН), что впервые в практике диагностики таких аппаратов открывает возможности контроля вибраций и колебаний фокальной плоскости в условиях орбитального полета, не реализуемых в условиях наземных испытаний, давая информацию для выработки корректирующих и проектных решений, повышающих качество видеоданных, получаемых космическими аппаратами наблюдения. Обнаружены вибрации фокальной плоскости частотой до 160 Гц и идентифицирован их источник.

8. Выявлен и формализован характеристический вектор многоматричного оптико-электронного преобразователя (МОЭП) в качестве инварианта всех изображений, формируемых оптико-электронным преобразователем КАН, независимый от маршрута и условий съемки и позволяющий оперативно в условиях орбитального полета оценивать геометрические параметры взаимного позиционирования матриц приборов с зарядовой связью в составе МОЭП. На его основе впервые в практике космических исследований решена задача

идентификации оптико-электронного преобразователя по сформированному им изображению.

Практическая значимость работы

Практическую значимость составляют разработанные методы, методики, алгоритмы, программное обеспечение (ПО) и методики построения ИИС, позволяющие решать комплекс практически важных задач обработки изображений подвижных яркостных полей.

1. Общая методика и апробированные алгоритмы совмещения изображений и построения карт диспаратности изображений, в том числе содержащих ракурсные, радиометрические, морфологические и спектральные различия.

2. Следующие программы и методики, нашедшие практическое применение:

2.1. ПО BlurCSKB расчета параметров смаза изображений, возникающего при нештатных режимах работы МОЭП целевой аппаратуры КАН. Программа разработана по техническому заданию 353П000-37578-1108-2010ТЗ на ОКР по теме «Разработка макета программного обеспечения, компенсирующего смазы, вызванные нештатной работой бортовой аппаратуры космического аппарата наблюдения (КАН) Ресурс-ДК» от ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» г. Самары. Программа способствовала продлению срока активного функционирования целевой аппаратуры КАН «Ресурс-ДК» на 5 лет: с декабря 2010г. до 2015 г.

2.2. Экспериментальное ПО для вычисления и коррекции с субпиксельной точностью параметров сшивки полос изображений, формируемых МОЭП. Коррекция основана на учете априори известных жестких механических (голономных) связей во взаимном расположении смежных ПЗС-матриц в составе МОЭП. ПО разработано в рамках ОКР по техническому заданию АДИС.000281-01 90 01 по теме «Разработка алгоритмов и экспериментального ПО «сшивки» с субпиксельной точностью изображений, формируемых ОЭП КАН Ресурс-ДК1» для ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» г. Самары.

2.3. Методика идентификации ОЭП по сформированному им изображению. Задача в практике космической съемки решена впервые.

2.4. ПО отработки методов и алгоритмов вычисления карт диспаратности двух последовательных во времени изображений.

2.5. ПО виртуальной коррекции взаимного расположения ПЗС матриц на картинной плоскости ИС.

2.6. ПО оценки на маршрутах съёмки качества работы системы управления движением КАН и параметров колебаний и вибраций фокальной плоскости оптической системы КАН.

Методы исследования

В работе использованы методы системного анализа, линейной алгебры, вычислительной математики, математической статистики, компьютерной графики, имитационного моделирования, дифференциального и интегрального исчислений, техники обобщенных функций, вычислительного эксперимента на тестовых и реальных изображениях, корреляционный анализ.

Положения, выносимые на защиту

1. Обобщенная математическая модель динамического изображения, связывающая перемещение изображения с векторным полем скоростей движения изображения (оптическим потоком), заданным на фокальной плоскости изобразительной системы автономной мобильной платформы, а также уравнение движения изображения для частного случая достаточной гладкости оптического потока.

2. Обобщенное уравнение оптического потока, связывающее параметры движения с измеримыми характеристиками изображений, вычисляемыми на подобластях изображения ненулевой площади.

3. Методика вычисления измеримых характеристик изображений на основе предложенных конструкций, нормированных нелинейных обобщенных функций (основных функционалов метода функционализации) со сложным составным ядром, позволяющая совмещать разнородные изображения, различающиеся ракурсом, спектральным диапазоном, яркостью, контрастом.

4. Методика высокоточного совмещения разнородных изображений и построения соответствующих карт диспарантности, реализующая компенсационный метод совмещения изображений, обеспечивающая несмещенные оценки вектора оптического потока.

5. Универсальная инвариантная классу совмещаемых изображений методика оценки погрешности совмещения разнородных изображений, имеющей форму двухкомпонентного вектора, характеризующего значение модуля ошибки совмещения изображений по координатам координатной системы, в которой представлены изображения, содержащая универсальный критерий останова итерационной процедуры совмещения изображений

6. Частные методики построения информационно-измерительных систем для решения впервые поставленных и решенных в практике космической съёмки актуальных прикладных задач параметрической идентификации движения изображений, ориентированных на реализацию в системах реального времени.

7. Методика обработки изображений для диагностики параметров колебаний и вибраций фокальной плоскости в условиях орбитального полета.

8. Характеристический вектор многоматричного оптико-электронного преобразователя как инвариант изображений, формируемых данным оптико-электронным преобразователем, независимый от маршрута и условий съемки, и методика его построения

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов подтверждается:

- корректностью постановки решаемых задач;
- корректностью доказательства основных положений работы;
- результатами многочисленных (десятками тысяч) вычислительных экспериментов с разнообразными по сюжету реальными изображениями, демонстрирующими стабильную воспроизводимость результатов;
- успешной эксплуатацией с декабря 2010г. разработанной программы BlurCSKB коррекции смазанных изображений, получаемых КАН типа "Ресурс";
- результатом решения задачи идентификации ОЭП в составе МОЭП непосредственно по изображению, сформированному данным ОЭП;
- результатами оценки параметров колебательных и вибрационных процессов фокальной плоскости на маршрутах съёмки, подтверждёнными наличием источников этих процессов с соответствующими частотными характеристиками;
- актами использования результатов работы в ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» г. Самары.

Соответствие паспорту специальности

Тематика диссертационного исследования, полученные теоретические и практические результаты соответствуют паспорту специальности 05.11.16 «Информационно-измерительные и управляющие системы (технические системы)» по следующим пунктам:

1. Научное обоснование перспективных информационно-измерительных и управляющих систем, систем их контроля, испытаний и метрологического обеспечения, повышение эффективности соответствующих систем.
4. Методы и системы программного и информационного обеспечения процессов отработки и испытаний образцов информационно-измерительных и управляющих систем.
6. Исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создание новых элементов, частей, образцов информационно-измерительных и управляющих систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений.

Апробация результатов

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 14 Всероссийских и Международных научно-технических и научно-практических конференциях, в том числе:

- CNPAA 2018 WORLD CONGRESS: 12th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences; Conference date: 3–6 July 2018; Location: Yerevan, Armenia; ISBN: 978-0-7354-1772-4; Editors: Seenith Sivasundaram; Volume number: 2046; Published: Dec 4, 2018;

- Юбилейной 25-й Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 28-30 мая 2018г. Санкт-Петербург, Россия;
 - 24-й Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 29-31 мая 2017г. Санкт-Петербург, Россия;
 - V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (V Козловские чтения) (11-15 сентября 2017 года, г. Самара);
 - 7-ой международной научно-технической конференции "КОСМОНАВТИКА. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА. ГЕОИНФОРМАТИКА.", Рязань, 4-6 октября 2017г;
 - Международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии» (ПИТ 2017), Самара, 14-16 марта 2017г.;
 - 8-й научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления - 2017». Москва. ИКИ РАН 14-16 марта 2017г.;
 - Международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии» (ПИТ 2016), Самара, 25-28 апреля 2017г.;
 - Научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления - 2013». Москва. ИКИ РАН 12-14 марта 2013г.
 - XV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» 25-28 июня 2013, г. Самара;
 - Всероссийской научно-технической конференции «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами». Москва-Раменское 20-21 сентября 2012г.;
 - Всероссийской научно-технической конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах». Санкт-Петербург: Концерн «ЦНИИ Электроприбор». 2012;
 - II Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники («II Козловские чтения»)): 12-16 сент. 2011, г. Самара;
 - Международной научно-технической конференции "Информационные, измерительные и управляющие системы (ИИУС-2010)". Самара: СамГТУ;
- Опубликованы в Internet в материалах:
- Proceedings of IFAC Workshop Aerospace Guidance, Navigation and Flight Control Systems June 30 – July 2, 2009, Samara, Russia. <http://lib.physcon.ru/?item=1886>;
 - Proceedings of 4th International Conference on Physics and Control (PhysCon 2009) September 1-4, 2009, Catania, Italy. <http://lib.physcon.ru/?item=1900>.

Публикации

Основное содержание диссертации изложено в 38 публикациях. Из них 3 в международных изданиях, индексируемых в Scopus и в Web Of Science, 12 в

изданиях из перечня, рекомендуемого ВАК РФ, 19 в материалах Международных и Всероссийских конференций; 2 интернет публикации IFAC и PhysCon, патент на изобретение, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора

Результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично и во взаимодействии с научным консультантом.

Основы защищаемого в диссертационной работе метода (метода функционализации) совмещения изображений разработаны научным консультантом. Относительно этого метода вклад автора состоит в его развитии применительно к решению широкого круга практических задач. При этом автором лично разработаны математические модели, методы, методики, алгоритмы решения рассматриваемых задач, разработан весь комплекс ПО, на базе которого отрабатывались все математические модели, методы, методики и алгоритмы решения задач. Постановка большинства задач, проведение десятков тысяч вычислительных экспериментов и обсуждение результатов проводились совместно с научным консультантом. Некоторые направления исследований инициированы лично автором.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения и приложений, изложена на 232 страницах, содержит 17 таблиц, 73 иллюстрации. Список литературы из 274 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, изложены цель и задачи исследования, дана общая характеристика работы, показана новизна научных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В Разделе 1 приведен обзор и анализ известных методов решения задачи совмещения изображений, отмечены их достоинства и недостатки, обосновано направление диссертационного исследования.

Общая структура ИИС ИПДИ представлена на рисунке 1 (Семавин В.И. Информационно-измерительная система идентификации движения яркостных объектов в реальном времени: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.11.16 / Семавин В.И. Самарск. гос. техн. ун-т. Самара. - 2006. – 153 с.).

На рисунке 1: ПЦЗ – постановщик целевой задачи; СФВД – система формирования выходных данных; СУРР – система управления режимами работы ИИС; СУД – система управления движением платформы ИИС; P_1 , P_2 – регуляторы СУД по каналам осей 1 и 2; ИЭ1, ИЭ2 – исполнительные элементы СУД; ДПОП – датчики пространственной ориентации платформы; ДСДП – датчики скорости движения платформы; ДЗЯО – дистанционно зондируемый яркостной объект; ОС – оптическая система; ПИ – фоточувствительный

приемник изображения; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ОЗУ – оперативное запоминающее устройство; БД – база данных; ПП – препроцессор; ВУ – вычислительное устройство; $B(x, t)$ – яркостное поле, где $x \in \mathbf{R}^2$; $E(x, t)$ – ФРО; $U(x, t)$ – аналоговые сигналы на выходе ПИ; $N(x, t)$ – видеоданные; $b_{i,j}, p_{i,j}$ – коэффициенты уравнения ОП; $v(x, t)$ – оценка вектора скорости движения изображения.

Далее шрифт формата *полужирный курсив* используется для обозначения векторов. Точка плоскости рассматривается как вектор. Вектор может представляться в матричной форме.

В современных системах наблюдения изображение, которое представляется функцией распределения освещенности (ФРО) фокальной плоскости (ФП) изобразительной системы (ИС), преобразуется опико-электронными преобразователями (ОЭП) в электронную форму и регистрируется на физических носителях в виде структурированных по времени и пространственным координатам наборов видеоданных (кадров видеоданных). Приведенная структура ИИС принята за основу при построении частных ИИС идентификации параметров движения изображений (ИПДИ).

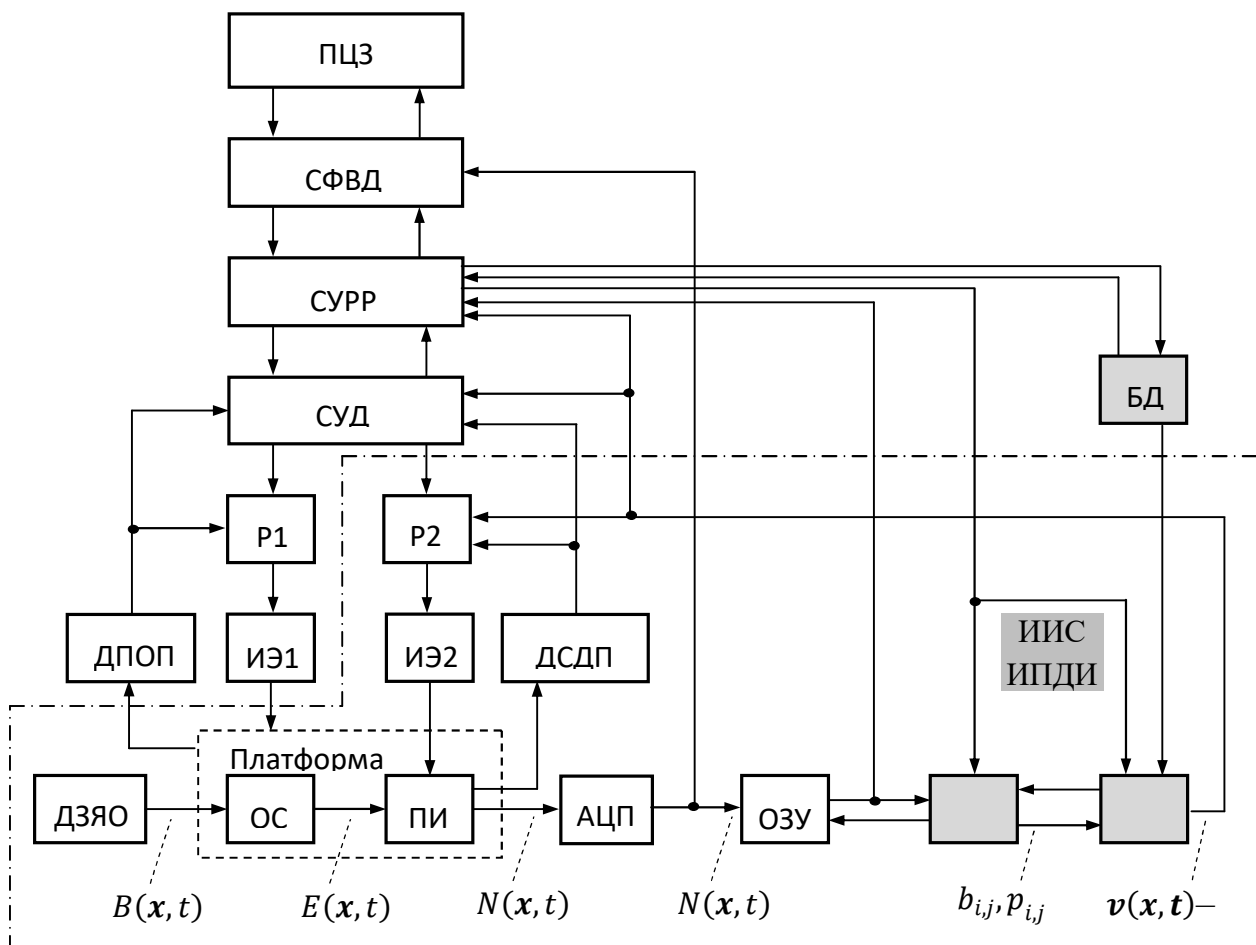


Рисунок 1 – Структурная схема ИИС ИПДИ в составе информационно-управляющей системы зондирования яркостных объектов

Непосредственно исследуется и модифицируется методология построения ИИС ИПДИ в части блоков БД, ПП и ВУ, представленных на рисунке 1.

В Разделе 2 предложена математическая модель в виде уравнения общего вида движения изображения, связывающая перемещение изображения с векторным полем скоростей движения изображения (оптическим потоком), заданным на фокальной плоскости ИС. Получено обобщенное уравнение оптического потока (ОУ ОП), устанавливающее связь параметров оптического потока с измеримыми характеристиками изображения. Изложены основы метода функционализации, предложенного для совмещения динамически меняющихся изображений наблюдаемой сцены. Выбрана функция веса основного функционала в виде мультипликативной функции, минимизирующей сложность вычисления как основного, так и индуцированных функционалов. Показано, что динамическая ошибка совмещения имеет «скоростной» характер и может быть снижена до нуля при использовании алгоритма совмещения с компенсацией наблюдаемого движения.

Проведен анализ влияния случайного аддитивного шума на погрешность оценки параметров движения изображения, получаемой методом функционализации.

Изображения представляются ФРО $E(x, t): E(x, t) \in \mathbf{R}^1$, заданной на фокальной плоскости (ФП) ИС в декартовой системе координат Oxu , $x = [x \ y]^T$.

Рассматривается класс динамических изображений, в котором каждый кадр изображения в момент времени t может быть получен из некоторой исходной ФРО $E(x, t_0)$ сдвигом каждой его точки x на величину, определяемую вектором сдвига $s(x, t): s(x, t) = [s_x(x, t) \ s_y(x, t)]^T$; $s(x, t_0) = \mathbf{0}$; $\mathbf{0} = [0 \ 0]^T$.

Предложена модель движения изображения в следующей форме:

$$E(x, t) = (1 + \gamma(t))E(x - s(x, t), t_0), \quad (1)$$

$$s(x, t) = \int_{t_0}^t v(x - s(x, \lambda), \lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где $v(x, t) = [v(x, t) \ u(x, t)]^T$ – вектор оптического потока в точке x в момент времени t ;

$(\gamma(t) > -1)$ – помеха типа «изменение освещенности» наблюдаемой сцены.

Оптический поток определяется законом движения яркостного поля и условиями наблюдения.

Систему уравнений (1, 2) далее будем называть *уравнением движения изображения*.

Уравнения движения в форме (1, 2) недостаточно для корректного описания динамического изображения с окклюзиями. При наличии окклюзий это преобразование должно быть дополнено правилом выбора корректного

доопределения оптического потока в точках $\mathbf{x}$, где значение сдвига $\mathbf{s}(\mathbf{x}, t)$ не является единственным или отсутствует. Правила доопределения различны в различных приложениях и зависят от конкретных условий решаемых задач.

В важном частном случае, когда на каждом кадре последовательности видеоданных вектор-функция $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$ удовлетворяет условиям Липшица, уравнение движения изображения (2) может быть преобразовано к эквивалентной системе дифференциальных уравнений:

$$\partial \mathbf{s}(\mathbf{x}, t) / \partial t = \mathbf{v}(\mathbf{x} - \mathbf{s}(\mathbf{x}, t), t); \quad \mathbf{s}(\mathbf{x}, t_0) = \mathbf{0}. \quad (3)$$

Система (1, 2), в силу единственности ее решений, определяет оператор непрерывного отображения некоторой подобласти исходного изображения $E(\mathbf{x}, t_0)$ на текущий кадр $E(\mathbf{x}, t)$.

В методе функционализации определяющее значение имеет ОУ ОП. Для его получения на рассматриваемом динамическом изображении выделяют односвязную подобласть (далее окно) анализа D с границей Γ без особенностей и на этой области определяют *основной функционал (ОФ) метода*. Простейшим основным функционалом является линейный функционал вида:

$$F(E(\mathbf{x}, t), t) = \iint_D K(\mathbf{x}) E(\mathbf{x} - \mathbf{s}(\mathbf{x}, t), t) d\mathbf{x} d\mathbf{y}, \quad (4)$$

где $K(\mathbf{x})$ - функция веса финитна, то есть непрерывная, ограниченная, дифференцируемая почти всюду по всем своим аргументам и равная нулю на границе Γ окна D и за его пределами.

Для практически важного случая, когда ОФ (4) рассматривается в момент времени $t = t_{0+}$, его полная производная по времени, вычисленная в силу уравнения движения изображения (1, 3), имеет вид:

$$\frac{d}{dt} F = F_x(\mathbf{v}) + F(\mathbf{v})_x + F_t, \quad (5)$$

$$\text{где } F_x(\mathbf{v}) = \iint_D \nabla(K(\mathbf{x})) \mathbf{v}(\mathbf{x}, t_0) E(\mathbf{x}, t_0) d\mathbf{x} d\mathbf{y},$$

$$F(\mathbf{v})_x = \iint_D K(\mathbf{x}) E(\mathbf{x}, t_0) \operatorname{div} \mathbf{v}(\mathbf{x}, t_0) d\mathbf{x} d\mathbf{y},$$

$$F_t = \iint_D K(\mathbf{x}) E_t(\mathbf{x}, t_0) d\mathbf{x} d\mathbf{y}.$$

Предложенная форма ОУ ОП (5) снимает проблему дифференцирования анализируемого изображения по пространственным координатам.

Известное уравнение связи, используемое в градиентных методах, получается из ОУ ОП (5) в частном случае, когда функция веса $K(\mathbf{x})$ имеет вид двумерной дельта-функции Дирака: $\delta(\mathbf{x}) = \delta(x) \delta(y)$.

Для вычисления оптического потока с использованием ОУ ОП (5) формируется система ОУ ОП для получения робастного решения. Такая

система названа *базисной системой уравнений*. Базисная система формируется параметризацией ОУ ОП. В качестве параметра могут быть выбраны различные параметры ОФ.

В диссертации рассматривается “локальный” вариант метода функционализации: определяется скорость $\mathbf{v}$ движения изображения в заданной окрестности точки $\mathbf{x}$ кадра $E(\mathbf{x}, t_0)$. Для этого на анализируемом изображении выделяют фрагмент Ξ . Этот фрагмент покрывают системой $\langle D^i \rangle$ окон анализа $D^i, i = 1, 2, \dots, N$. Считается, что на фрагменте Ξ скорость движения всех точек изображения одинакова ($\mathbf{v} = \text{const}$). На каждом окне D^i системы $\langle D^i \rangle$ строится ОУ ОП вида (5) и из полученного множества уравнений формируется базисная система в виде переопределенной системы уравнений, имеющей вид:

$$\dot{\mathbf{F}} = \mathbf{F}_x \mathbf{v} + \mathbf{F}_t, \quad (6)$$

где $\dot{\mathbf{F}} = \left[\frac{d}{dt} F^i \right]$ - матрица-столбец: $F^i = \iint_{D^i} K^i(\mathbf{x}) E(\mathbf{x}) dxdy$,

$\mathbf{F}_x = [F_x^i \ F_y^i]$ - матрица $(N \times 2)$:

$$F_x^i = \iint_{D^i} K_x^i(\mathbf{x}) E(\mathbf{x}) dxdy, \ F_y^i = \iint_{D^i} K_y^i(\mathbf{x}) E(\mathbf{x}) dxdy, \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_t = [F_t^i].$$

Функционалы F_x^i, F_y^i называются *индуцированными функционалами* метода.

Система (6) преобразуется к *базисной нормальной системе* (БНС):

$$\mathbf{F}_x^T \dot{\mathbf{F}} = \mathbf{F}_x^T \mathbf{F}_x \mathbf{v} + \mathbf{F}_x^T \mathbf{F}_t. \quad (8)$$

Очевидно, что если $\mathbf{F}_t = \mathbf{0}$, то решение БНС (8) существует и единственно тогда и только тогда, когда матрица $\mathbf{F}_x^T \mathbf{F}_x$ не вырождена. В связи с этим показано, что необходимым и достаточным условием отсутствия единственности решения системы (8) является наличие особой структуры ФРО, при которой градиент ФРО одинаков для всех точек фрагмента Ξ (апертурная проблема). При этом, как известно, показателем близости матрицы A к вырожденной является число обусловленности матрицы $\mu(A)$. Принимая во внимание, что в рассматриваемом случае матрица $\mathbf{F}_x^T \mathbf{F}_x$ имеет диагональное преобладание по построению, будем оценивать число обусловленности как

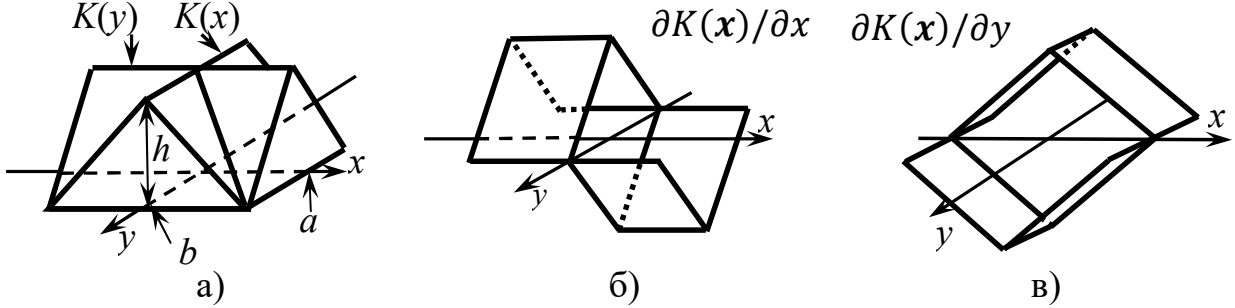
$$\mu(A) < (\max_i |a_{ii}| + \sum_{j \neq i} |a_{ij}|) (\min_i |a_{ii}| - \sum_{j \neq i} |a_{ij}|)^{-1}, \quad (9)$$

где a_{ij} – элементы матрицы A размером 2×2 .

Далее будем полагать, что матрица хорошо обусловлена, если

$$\mu(A) < 10. \quad (10)$$

С целью уменьшения сложности вычисления функционалов в работе выбрана мультипликативная функция веса вида $K(\mathbf{x}) = K(x) \cdot K(y)$ (рисунок 2).



а) - составляющие $K(x)$ и $K(y)$, мультипликативной функции веса $K(\mathbf{x})$ в виде поверхностей трехгранных призм; б), в) – визуальные представления производной $\partial K(\mathbf{x})/\partial x \equiv K_x(\mathbf{x})$ и $\partial K(\mathbf{x})/\partial y \equiv K_y(\mathbf{x})$.

Рисунок 2 – Составляющие мультипликативной функции веса и ее производные

Предложенная форма функции $K(\mathbf{x})$ минимизирует вычислительные затраты как на вычисление значений самой функции, так и ее производных по координатным осям. При $a = b = h$ (рисунок 2а) для $\mathbf{x} \in D$ получаем: $K(\mathbf{x}) = (a - |x|)(a - |y|)$, $K_x(\mathbf{x}) = -\text{sign}(x)(a - |y|)$, $K_y(\mathbf{x}) = -\text{sign}(y) \times (a - |x|)$. При таком выборе сложность вычисления основного функционала F^i оказывается наименьшей из всех возможных, и отсутствуют методические погрешности вычисления производных F_x^i и F_y^i (7) функционалов F^i .

Предложена методика оценки влияния случайного аддитивного шума, присутствующего в изображении, на погрешность оценки скорости движения изображения для случая $\mathbf{F}_t = \mathbf{0}$. В этом случае ОФ (4) принимает вид:

$$\tilde{F} = \iint_D K(\mathbf{x}) \tilde{E}(\mathbf{x}, t) dx dy, \quad (11)$$

где $\tilde{E}(\mathbf{x}, t) = E(\mathbf{x}) + h(\mathbf{x}, t)$ – видеосигнал; $E(\mathbf{x})$ – изображение без шума; $h(\mathbf{x}, t)$ – случайная функция шума.

Предполагается: случайные функции $E(\mathbf{x}, t)$, $h(\mathbf{x}, t)$ эргодичны и взаимно не коррелированы; случайная функция шума $h(\mathbf{x}, t)$ центрирована и выполнены условия дифференцируемости ее реализаций (в обобщенном смысле) по всем ее аргументам.

На покрытии $\langle D^i \rangle$ окрестности некоторой точки $\mathbf{x}$ кадра изображения $E^\Theta(\mathbf{x}, t)$ строится БНС уравнений следующего вида:

$$\tilde{\mathbf{F}}_x^T \dot{\tilde{\mathbf{F}}} = \tilde{\mathbf{F}}_x^T \tilde{\mathbf{F}}_x \hat{\nu}, \quad (12)$$

где $\ddot{\mathbf{F}}, \ddot{\mathbf{F}}_x$ получаются из (7) заменой изображения $E(\mathbf{x})$ на видеосигнал $\tilde{E}(\mathbf{x}, t)$; $\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{v} + \Delta\mathbf{v} = [\hat{v} \ \hat{u}]^T$ - вектор-столбец оценки вектора $\mathbf{v}$; $\Delta\mathbf{v} = [\Delta v \ \Delta u]^T$ - вектор-столбец оценки погрешности вектора $\mathbf{v}$.

Первое уравнение БНС (12) записывается в виде (второе уравнение имеет аналогичный вид):

$$\begin{aligned} \sum(H_t F_x + H_t H_x) = & v \sum(H_x)^2 + \Delta v \sum(\tilde{F}_x)^2 + v \sum(F_x H_x) + \\ & + u \sum(F_x H_y + H_x H_y) + \Delta u \sum(F_x F_y + H_x H_y + F_x H_y + F_y H_x), \end{aligned} \quad (13)$$

где $H_\alpha^i = \iint_{D_i} K_\alpha^i(\mathbf{x}) h(\mathbf{x}, t) dxdy$, $\alpha \in \{x, y\}$,

$H_t^i = \iint_D K^i(\mathbf{x}) h_t(\mathbf{x}, t) dxdy$.

В (13) суммирование ведется по всем окнам покрытия $\langle D^i \rangle$.

Показано, что из правдоподобного предположения о некоррелированности функций $\tilde{F}_x^i$ и $\tilde{F}_y^i$, а так же H_x^i и H_y^i как случайных функций номера окна анализа в покрытии $\langle D^i \rangle$, вытекает следующая оценка $\Delta\mathbf{v}$ погрешности вычисления вектора скорости:

$$\Delta\mathbf{v} \simeq -\mathbf{NSR} \mathbf{v}, \quad (14)$$

где $\mathbf{NSR} = [\mathbf{NSR}_x \ \mathbf{NSR}_y]$ – вектор-строка, компоненты которого характеризуют отношения шум/сигнал:

$$\mathbf{NSR}_x = \sum(H_x)^2 \left(\sum(\tilde{F}_x)^2 \right)^{-1}, \mathbf{NSR}_y = \sum(H_y)^2 \left(\sum(\tilde{F}_y)^2 \right)^{-1}. \quad (15)$$

Возможная оценка значений функционалов H_α следующая:

$$H_\alpha = F_\alpha - F_\alpha(E(\mathbf{x} + \mathbf{s})), \alpha \in \{x, y\}.$$

Из (14) следует, что значение смещения получаемой оценки скорости изображения пропорционально самой скорости движения, то есть имеет место «скоростная ошибка». Скоростная ошибка может быть сведена к нулю применением компенсационного метода измерения.

Раздел 3

Для цифровых видеоданных первое приближение БНС уравнений (12) принимает вид:

$$\bar{\mathbf{F}}_x^T \Delta \mathbf{F} \simeq \bar{\mathbf{F}}_x^T \bar{\mathbf{F}}_x \hat{\mathbf{s}}, \quad (16)$$

где компоненты вектора $\Delta \mathbf{F}$ вычисляются как разности пар основных функционалов (4), определенных на одноименных окнах D^i систем покрытия $\langle D^i \rangle_1$ и $\langle D^i \rangle_2$ фрагментов Ξ_1 и Ξ_2 ;

компоненты вектора $\bar{\mathbf{F}}_x$ - усредненное значение по одноименным окнам D^i соответствующих компонент функционала $\mathbf{F}_x$;

$\hat{\mathbf{s}} = [\hat{s}_x \ \hat{s}_y]^T$ - вектор оценки смещения $\mathbf{s}$ положения фрагмента Ξ_2 на втором кадре относительно положения фрагмента Ξ_1 на первом кадре видеоданных.

Система (16), записанная в явном виде относительно $\hat{\mathbf{s}}$, служит основой следующей итерационной процедуры вычисления оценки $\hat{\mathbf{s}}$ вектора $\mathbf{s}$:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{s}}(k) &= \hat{\mathbf{s}}(k-1) - \lambda \Delta \hat{\mathbf{s}}(k), \\ \Delta \hat{\mathbf{s}}(k) &= (\bar{\mathbf{F}}_x^T \bar{\mathbf{F}}_x)^{-1} (\bar{\mathbf{F}}_x^T (\mathbf{F}(\hat{\mathbf{s}}(k-1) - \mathbf{s}) - \mathbf{F})), \hat{\mathbf{s}}(0) = \mathbf{s}_0, \end{aligned} \quad (17)$$

где k - номер итерации;

λ - коэффициент обратной связи ($\lambda > 0$).

Значение функционала $\mathbf{F}$ вычисляется на неподвижном фрагменте Ξ_1 , а функционала $\mathbf{F}(\hat{\mathbf{s}}(k) - \mathbf{s})$ - на текущем фрагменте $\Xi_2(k)$ второго кадра.

Исследованы динамические свойства предложенной итерационной процедуры (17). Относительно условия ее сходимости при достаточно малых значениях смещения $\mathbf{s}$, *показано*: положение равновесия системы (15) равномерно асимптотически устойчиво; итерационный процесс сходится «в малом» не более чем за одну итерацию, вне зависимости от вида анализируемого изображения, при условии, что ФРО изображений удовлетворяет условиям существования и единственности решений системы (8).

Номер итерации k , на которой процедура (17) может быть остановлена, определяется, с использованием вычисляемых на каждой итерации соотношений (12), следующим образом:

$$k = \min\{k_{term}, k_m\}, \quad (18)$$

где $k_{term} = \min\{k | Kr(k) \leq \rho\}$, $\rho > 0$ - пороговое значение критерия останова $Kr(k) = \max\{NSR_x(k), NSR_y(k)\}$ (15);

k_m - максимально допустимое количество итераций.

Предложенный критерий останова $Kr(k)$ (18) имеет ясную физическую трактовку: его значение есть прогнозируемая ошибка совмещения на последующей $(k+1)$ -ой итерации совмещения в предположении, что на k -ой итерации ошибка равна одной единице линейной меры плоскости изображений.

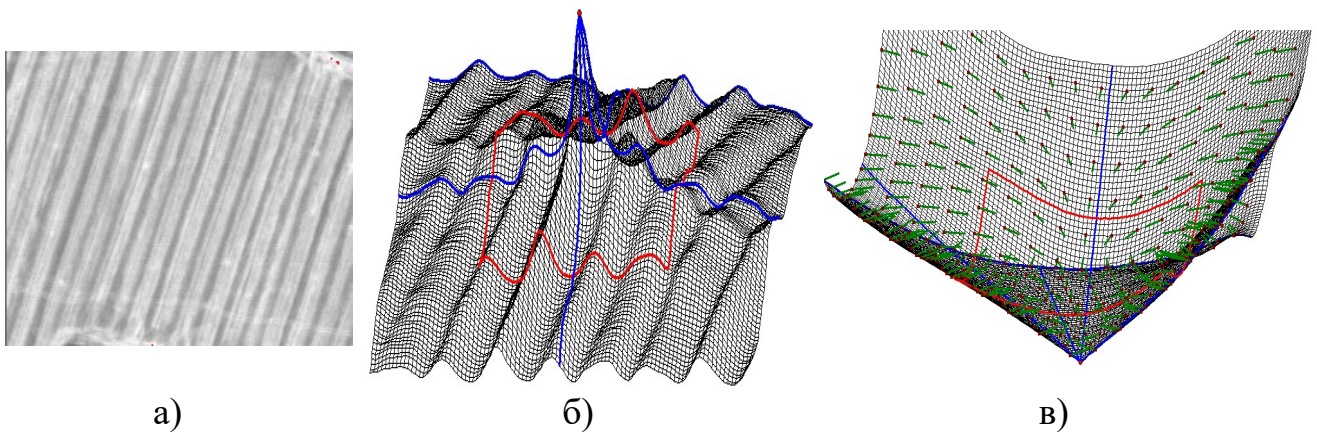
Пороговое значение ρ критерия и максимальное количество итераций k_m задаются исходя из специфики решаемой задачи. Как показывает опыт решения практических задач, при самых больших смещениях $\mathbf{s}$, при которых процедура (17) еще сходится, количество востребованных итераций не превышает значений два - четыре.

Получены оценки максимально допустимого относительного смещения сопряженных фрагментов, при котором процедура (17), при задании равной нулю ($\hat{\mathbf{s}}(0) = \mathbf{0}$) начальной оценки смещения, обеспечивает обнаружение и совмещение сопряженного фрагмента. Множество векторов таких смещений образует область притяжения ($\Pi(\mathbf{s})$) фрагмента интереса.

С целью оценки размеров области притяжения при использовании системы (12) были проведены вычислительные эксперименты на реальных космических изображениях.

Эксперименты показали, что уже после 3 итераций размеры области начального смещения фрагментов, из точек которой итерационная процедура сходится, в 2-2,5 раза превышали площадь окон анализа (размеры окон варьировались от 12×12 до 32×32 пикселя). На этом основании можно утверждать, что в экспериментах совмещение фрагментов происходило не более чем за 3 итерации при значениях начальных смещений $\mathbf{s}_0$, не выходящих за границы области притяжения.

На рисунке 3 приведен фрагмент изображения с сюжетом «скошенное поле». Оценка АКФ для него относительно центра фрагмента имеет множество локальных экстремумов (рисунок 3а). Поверхность на рисунке 3в визуализирует поле векторов оценок $\hat{\mathbf{s}}$ (16) взаимного смещения $\mathbf{s}$ положения подвижного фрагмента Ξ_2 относительно положения неподвижного фрагмента Ξ_1 , вычисленных на первой итерации процедуры (17) при варьировании задаваемых значений компонент вектора $\mathbf{s}$ на интервале $[-50, 50]$ пикселей. Таким образом, поверхность построена по $101 \times 101 = 10201$ вариантам вектора $\mathbf{s}$. Высота точки поверхности над ее нижней точкой равна $|\hat{\mathbf{s}}|$. Нанесенные на поверхность векторы одинаковой длины задают направления векторов $\hat{\mathbf{s}}$.



а) – фрагмент исходного изображения; б) - оценка АКФ фрагмента изображения; в) - критериальная функция совмещения изображений на основе итерационной процедуры в виде аксонометрической проекции поверхности.

Рисунок 3 – Результат экспериментов с сюжетом типа «скошенное поле»

На рисунке 3 присутствует достаточно большой фрагмент с регулярной линейной структурой, порождающей периодическую АКФ с четко выраженными локальными экстремумами. Эксперименты, проведенные с

представленным изображением, показали малую чувствительность разработанной процедуры совмещения к этим локальным экстремумам АКФ, что наглядно подтверждается примером поверхности на рисунке 3в.

Раздел 4

В случае достаточной малости ракурсных и морфологических искажений реальные видеосигналы $\tilde{E}$ представимы моделью:

$$\tilde{E}(\mathbf{x}, t) = E(\mathbf{x}, t) + \eta(\mathbf{x}) + h(\mathbf{x}, t), \quad (19)$$

где $E(\mathbf{x}, t) = (1 + \gamma(t)) I(\mathbf{x}, t)$; $I(\mathbf{x}, t)$ - информативная часть видеосигнала; $\gamma(t): \mathbf{T} \Rightarrow \mathbf{R}_+^1$, $\gamma(t) > -1$ - радиометрическая помеха; $\eta(\mathbf{x})$ - низкочастотный «геометрический шум», специфичный для конкретной ПЗС матрицы; $h(\mathbf{x}, t)$ - случайная функция шума.

По аналогии с описанным в разделе 2 используется «локальный» метод поиска и совмещения сопряженных фрагментов изображения. При этом на анализируемых изображениях выделяются фрагменты, которые покрывают аналогичными системами $\langle D^i \rangle$ окон анализа D^i , $i = 1, 2, \dots, N$. Задача решается итерационной процедурой вида (17), в которой изменен вид основного функционала так, чтобы его значения были мало зависимы от возмущений. Для получения такой малой зависимости, во-первых, функционал нормируется, во-вторых, его числитель строится линейной комбинацией «простых» ОФ вида (11), каждый из которых определен на отдельном окне анализа. Для построения комбинации ОФ задается множество Ψ , отдельный элемент которого задает упорядоченное множество номеров окон, определяющих отдельную комбинацию ОФ. Окна анализа, составляющие одну комбинацию, должны иметь непустые пересечения.

Проведенный перебор вариантов с последующей апробацией на реальных снимках показал, что наиболее плотно оптический поток в рассматриваемой задаче восстанавливается с использованием нормированных «псевдодифференцирующих» основных функционалов, представляющих собой нормированные нелинейные обобщенные функции со сложным составным ядром. Использовались два варианта таких функционалов:

$$\phi^{(ij)} = (N^{(ij)}) G^{-0,5}, \quad (20)$$

где $N^{(i \prec j)} = F^i - F^j$, $F^\beta = \iint_{D^\beta} K^\beta(\mathbf{x}) \tilde{E}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} d\mathbf{y}$, $\beta \in \{i, j\}$;
 $G(\tilde{E}) = \sum_{(i,j) \in \Psi} (N^{(ij)})^2$, Ψ - множество пар номеров окон анализа;

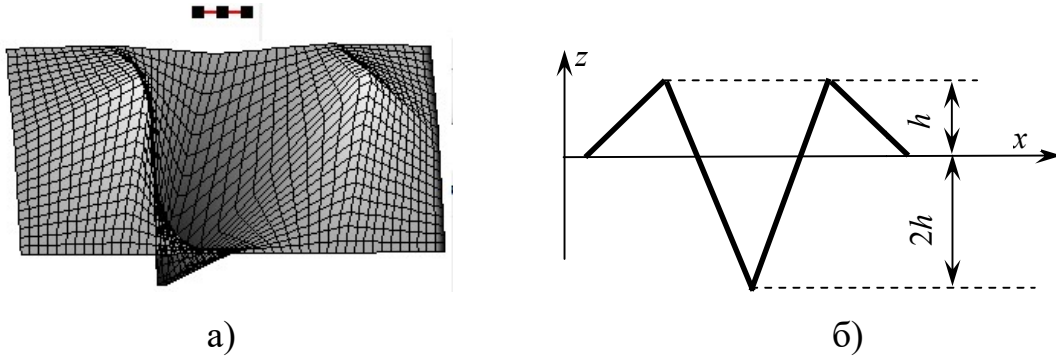
$$\phi^{(ijm)} = (N^{(ijm)}) G^{-0,5}, \quad (21)$$

где $N^{(ijm)} = F^i - 2F^j + F^m$, $F^\beta = \iint_{D^\beta} K^\beta(x) \tilde{E}(x) dx dy$, $\beta \in \{i, j, m\}$;

$G(\tilde{E}) = \sum_{(i,j,m) \in \Psi} (N^{(ijm)})^2$, Ψ – множество троек номеров окон анализа.

Функционалы (20) и (21) дают оценки 1-й и 2-й производных изображений. По своей конструкции эти функционалы практически инвариантны к мультипликативной помехе $\gamma_\alpha(t)$, а также к геометрическому шуму ПЗС матриц.

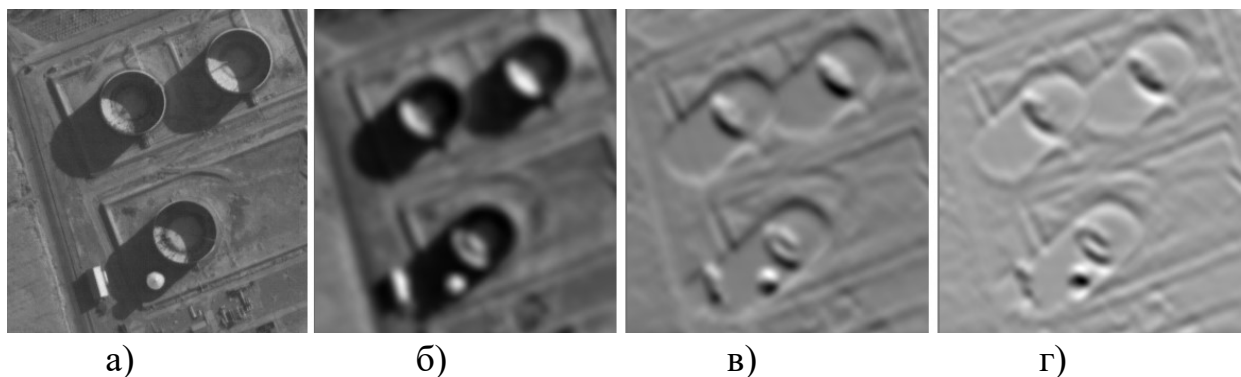
На рисунке 4а приведен пример функции веса функционала $N^{(ijm)}$.



а) – представление функции веса функционала $N^{(ijm)}$ в виде проекции поверхности; б) – схематическое изображение сечения поверхности (рисунок 3а) плоскостью, проходящей через центры окон анализа.

Рисунок 4 – Пример функции веса числителя функционала (21)

На рисунке 5 визуализированы вычисленные поля свертки исходного изображения при использовании функционалов в качестве ядра свертки. При этом поле вычисленных значений свертки нормировалось приведением к диапазону $[0, 255]$ единиц яркости.



а) – исходное изображение; б), в), г) – свертки исходного изображения функционалами: б) – функционалом F^β из (20); в) – функционалом $N^{(ij)}$ из (20) на основе пары окон смещенных по вертикали; г) – функционалом $N^{(ij)}$ из (21) на основе тройки окон, смещенных по вертикали.

Рисунок 5 – Результаты вычисления свертки исходного изображения при использовании функционалов в качестве ядра свертки, построенных на основе окон анализа размером 16×16 пикселей

Предложена методика построение базисной системы уравнений на основе предложенных функционалов, результатом которой является БНС уравнений для вычисления оценки $\hat{\mathbf{S}}$ искомого смещения $\mathbf{S}$ вида:

$$\bar{\mathbf{F}}_x^T \Delta \Phi = \bar{\mathbf{F}}_x^T \bar{\mathbf{F}}_x \hat{\mathbf{S}}, \quad (22)$$

где структура матрицы $\bar{\mathbf{F}}_x^T \bar{\mathbf{F}}_x$ следующая: $\bar{\mathbf{F}}_x^T \bar{\mathbf{F}}_x = \begin{bmatrix} \bar{a}_{xx} & \bar{a}_{xy} \\ \bar{a}_{xy} & \bar{a}_{yy} \end{bmatrix}$.

На основе (22) строится итерационная процедура совмещения фрагментов аналогичная процедуре (17).

При выводе оценки погрешности совмещения изображений примем во внимание практическую инвариантность к помехам $\eta(\mathbf{x})$ и $\gamma(t)$ предложенных функционалов вида (20) и (21) и используем упрощенную модель видеосигнала (19) в виде:

$$\tilde{E}(\mathbf{x}, t) = I(\mathbf{x}, t) + h(\mathbf{x}, t). \quad (23)$$

Искомая оценка погрешности совмещения изображений имеет вид:

$$\mathbf{K}\mathbf{r} = (\bar{\mathbf{F}}_x^T \bar{\mathbf{F}}_x)^{-1} \mathbf{k}, \quad (24)$$

где $\mathbf{K}\mathbf{r} = [Kr_x \ Kr_y]^T$ – оценка погрешности совмещения;

$\mathbf{k} = [k_x \ k_y]^T$, $k_\alpha = \sum H_{N\alpha}^2 + \sum (H_{Nx} H_{Ny})$, $\alpha \in \{x, y\}$,

$$H_{N\alpha}^{(ij)} = (G_L)^{-0,5} \left(\iint_{D^i} K_\alpha^i(\mathbf{x}) h(\mathbf{x}, t) dx dy - \iint_{D^j} K_\alpha^j(\mathbf{x}) h(\mathbf{x}, t) dx dy \right).$$

Значения функционалов $H_{N\alpha}^{(ij)}$ в (24) определены на сигнале шума $h(\mathbf{x}, t)$ и не могут быть измерены непосредственно. Возможный вариант вычисления оценок для них следующий:

$$H_{N\alpha} \cong |N_{L\alpha}(G_L)^{-0,5} - N_{R\alpha}(G_R)^{-0,5}|, \alpha \in \{x, y\}. \quad (25)$$

Инвариантность функционалов (20), (21) к мультипликативным отличиям совмещаемых изображений иллюстрируется рисунком 6 с изображениями, снятыми в спектральных диапазонах G и B , и успешно совмещенными при использовании функционала (20).

По результатам совмещения изображений (рисунок 6) получена следующая статистика:

- отношение средних яркостей изображений 1,7;
- процент совмещений: $\approx 93\%$;
- средняя скорость (трудоемкость) совмещения: 1,01 итераций на совмещение (итерации неудачных совмещений не учитывались).

В таблице 1 представлена статистика, полученная по результатам обработки сверток изображений, представленных на рисунке 6. Для каждого из изображений были вычислены по две свертки: с использованием функционала (20) и функционала (21) в качестве ядра свертки. При этом использовались окна анализа размером 24×24 пикселя. В таблице 1 условное обозначение «G»/«B» означает отношение данных из строки «G» к данным в строке «B».

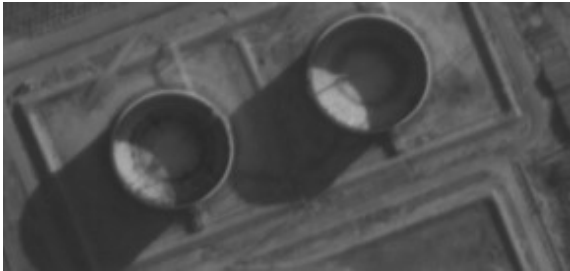


Рисунок 6 – Фрагменты совмещенных спектрональных изображений с большими различиями мультипликативного характера: отношение средних яркостей изображений равно 1,7.

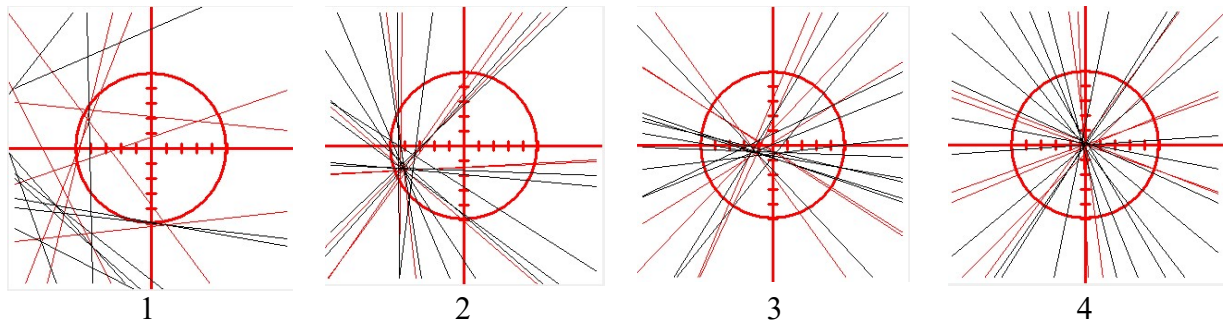
Отношения статистических данных (строки «G»/«B» таблицы 1) в основном группируются около значения 1. Следовательно, применение предложенных функционалов выравнивает статистические параметры изображений с большими различиями мультипликативного характера.

Таблица 1 – Результаты статистической обработки изображений из сопряженного пространства, полученных из спектрональных изображений (рисунок 6) отображением функционалами (20) и (21)

Вид основного функционала	Зона спектра	Значения свертки			
		min	max	Среднее	СКО
(20)	G	-0,633	0,623	-0,00016	0,00081
	B	-0,630	0,628	-0,00071	0,00081
	«G»/«B»	1,005	0,992	0,225	1
(21)	G	-0,523	0,529	0,0080	0,00070
	B	-0,521	0,516	0,0074	0,00070
	«G»/«B»	1,005	1,018	1,081	1

На рисунке 7 переопределенные системы линейных уравнений, получаемые на итерациях процедуры совмещения фрагментов, визуализированы в виде прямых, построенных по коэффициентам уравнений этой системы в системе координат искомого решения. Расстояние между соседними рисками на осях координат соответствует 1 пикселю. Совмещались фрагменты спектрональных изображений, представленных на рисунке 6.

На рисунке 7 виден процесс все большего упорядочивания системы прямых и стремления точек их взаимных пересечений к началу системы координат, то есть к нулевому решению. Система уравнений, построенная на 4-й итерации, породила систему прямых, пересекающихся в точке нулевого решения. Это значит, что итерационный процесс сошелся за 3 итерации. Последняя итерация лишь фиксирует факт окончания процесса совмещения.



1 – 4 – номера итераций, на которых сформирована визуализированная переопределенная система уравнений

Рисунок 7 – Динамика изменения переопределенной системы уравнений на итерациях совмещения в виде семейства прямых, построенных по коэффициентам уравнений

В Разделе 5 описано применение разработанного ПО для решения важных практических задач, связанных с обработкой аэрокосмических снимков, сформированных МОЭП.

Задача сшивки полос изображений

Задача сшивки полос изображений порождена взаимным расположением ФПЗС матриц на ФП как показано на рисунке 8. Каждая из матриц генерирует отдельную полосу изображения. Несколько таких полос упаковываются в отдельный файл видеоданных. Пересечения смежных сторон матриц приводит к появлению в области смежных сторон соседних полос изображений повторяющихся изображений одних и тех же наблюдаемых объектов. Сшивка полос состоит в таком их совмещении, при котором оказываются совмещенными одинаковые фрагменты в изображениях полос. С этой целью рассчитывается поле векторов $\mathbf{s}(y) = (s_x(y), s_y(y))$ локальных совмещений фрагментов изображений. Отдельный вектор такого поля будем называть *вектором сшивки*, а все поле векторов – *протоколом сшивки* (ПС). Области смежных сторон соседних полос изображений, содержащие изображения одних и тех же объектов назовем *швом*.

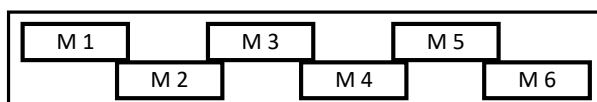


Рисунок 8 – Расположение матриц на ФП

С целью исследования метрологических характеристик разработанных процедур совмещения были поставлены вычислительные эксперименты над

искусственно созданными швами, для которых вектор сшивки известен для каждой строки y сшиваемых полос изображений. Искусственный шов создавался «вырезанием» из реального космического изображения двух полос: левая полоса вырезалась с прямолинейными вертикальными границами и правая - с вертикальными границами, описываемыми затухающими гармоническими колебаниями:

$$s_x(y) = -36 + 6e^{-ky} \cos(\omega y), \quad (26)$$

где $k = 2 \cdot 10^{-5}$;

ω - круговая частота;

36 – типичное проектное значение меж матричного перекрытия матриц ФПЗС в структуре ОЭП (рисунок 8), выраженное количеством ячеек ПЗС матриц;

y – номер строки изображения.

Параметры колебаний (скорость изменения ширины шва, ширина шва), заданные выражением (26) в разы превосходят соответствующие параметры реальных швов.

В каждую из сформированных полос привносился аддитивный шум с равномерным законом распределения на интервале $[-A; A]$ [емр] (единиц младшего разряда) кода яркости с математическим ожиданием равным 0. Использовались значения $0 \leq A \leq 100$. Для экспериментов были выбраны изображения, содержащие в себе разнообразные сюжеты, попадающие в вырезаемые полосы изображений: поля, горы, населенные пункты. Процесс вырезания полос сопровождался совместной обработкой исходного не зашумленного изображения с зашумленным. Вычислялись два параметра: среднеквадратичная ошибка (СКО) ($RMSE$ - root-mean-square error) и отношение пикового уровня сигнала к шуму ($PSNR$ – peak signal-to-noise-ratio).

В диссертации приведены результаты обработки двух изображений, из которых вырезались полосы, обозначенных как I_1 и I_2 . Средняя яркость этих изображений в области швов составили 194 и 246 [емр]. При максимально возможной яркости равной 1023 [емр] эти изображения можно характеризовать как изображения «среднего» качества. При вычислении $PSNR$ в качестве пикового значения сигнала использовалось значение 1023. Поэтому, с учетом приведенных средних яркостей, полученные оценки $PSNR$ завышены.

По техническим условиям максимально допустимый уровень шума, создаваемый ПЗС матрицами, менее 7 [емр]. В компьютерных экспериментах минимальная отличная от нуля амплитуда привнесенного шума принималась равной 10 [емр].

При обработке изображений использовался функционал (20). Для изображения I_1 использовался параметр $\omega = 4\pi \cdot 10^{-5}$ [рад/строку]; для изображения I_2 - $\omega = 6\pi \cdot 10^{-5}$ [рад/строку].

В таблице 2 приведены параметры зашумленности сформированных полос изображений в области швов.

Таблица 2 – $RMSE$ и $PSNR$ для двух изображений

	Изображение I_1			Изображение I_2		
A , [емр]	10	20	40	10	20	40
$RMSE$, [емр]	5,78	11,55	23,06	5,79	11,56	23,10
$PSNR$, [дБ]	44,95	38,94	32,94	44,94	38,94	32,93

В таблице 3 приведены результаты восстановления швов от двух изображений с различными уровнями зашумленности.

Таблица 3 – Ошибки восстановления швов и процент удачных сшивок

	Изображение I_1			Изображение I_2		
A , [емр]	0	20	40	0	20	40
Процент удачных сшивок	99.86	88.01	56.42	100.00	94.96	80.50
Процент удачных сшивок на 1-й итерации	99.72	81.66	42.45	99.96	89.88	66.27
μ , [пикс.]	-0.0479	-0.0499	-0.0712	-0.0123	-0.0087	0.0051
D	0.022	0.030	0.036	0.009	0.041	0.052
σ	0.148	0.173	0.191	0.096	0.204	0.228

В таблице 3 μ обозначает среднюю ошибку.

При обработке изображений выполнялось 720 попыток сшивки на один шов от изображения I_1 и 2280 попыток сшивки на один шов от изображения I_2 .

На рисунке 9 приведен график изменения ошибки сшивки вдоль маршрута. На рисунке 10 – скорость изменения ширины шва вдоль маршрута. На рисунках 9, 10 по оси абсцисс указаны номера сшивок вдоль маршрута, распределенные по маршруту равномерно. Эти номера эквивалентны времени в некотором масштабе. По оси ординат указаны значения в пикселях. Графики убедительно показывают, что имеет место «скоростная» ошибка, теоретически предсказанная в разделе 2 (14).

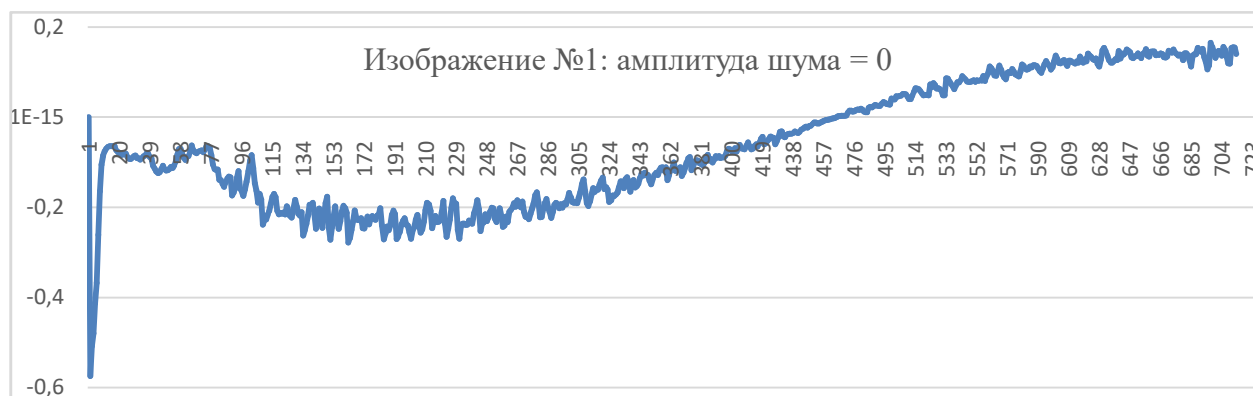


Рисунок 9 – График ошибок восстановления шва



Рисунок 10 – График скорости изменения ширины шва

На примере задачи сшивки полос изображений, формируемых МОЭП, показана высокая степень робастности алгоритма сшивки полос изображений к аддитивному шуму и к разнообразным сюжетам в изображениях, а также высокая точность восстановления швов и скорость алгоритмов.

Задача определения параметров “смаза” изображений

При некоторых режимах съемки подстилающей поверхности широкоформатными МОЭП появляются заметные смазы в формируемых МОЭП видеоданных. Здесь рассматриваются смазы, связанные с движением ФРО по ФП ИС и работой матриц ФПЗС в режиме временной задержки и накопления зарядов при сканирующей съёмке маршрута.

Смаз формируется как интеграл от лучистой энергии, достигшей ФП и распределенной по некоторой площади, вытянутой вдоль вектора $\mathbf{B}$ (blur) касательного к траектории движения изображения по ФП. Вектор $\mathbf{B} = (b_x, b_y)$ будем называть вектором смаза, понимая что смаз имеет не векторный характер. Компонента b_x – параметр смаза в поперечном направлении (вдоль строки ячеек ФПЗС); b_y – параметр смаза в продольном направлении (вдоль столбцов ячеек ФПЗС).

Практика показала, что параметры смазов любого пикселя изображения могут быть с достаточной точностью вычислены по распределению параметров смаза вдоль швов. Параметры смаза в локальной точке шва выражаются через компоненты вектора из ПС:

$$b_x = (s_x + \Delta m)n / (s - s_y); \quad b_y = (s_y + \Delta s)n / (s - s_y), \quad (26)$$

где (s_x, s_y) – вектор сшивки из ПС; s – проектное расстояние между одноименными строками смежных матриц («скоба»); n – заданное для данного маршрута количество строк накопления зарядов в ПЗС матрице, работающей в режиме ВЗН; Δs и Δm – отклонения от проектных значений истинных размеров «скобы» и меж матричного пересечения смежных матриц, выраженные в пиксельной метрике.

Закономерность (26) использована в программе BlurCSKB, разработанной по техническому заданию 353П 000-37578-1108-2010ТЗ на ОКР по теме «Разработка макета программного обеспечения, компенсирующего смазы, вызванные нештатной работой бортовой аппаратуры космического аппарата наблюдения (КАН) Ресурс-ДК» от ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» г.

Самары. Программа способствовала продлению срока активного функционирования КАН «Ресурс-ДК1» на 5 лет: с декабря 2010г. по 2015 г.

Длительный опыт успешной эксплуатации в ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» программы BlurCSKB показал, что разработанные методы, методики и алгоритмы позволяют обрабатывать с достаточной точностью изображения со смазом до 100 и более пикселей.

Исследование динамики фокальной плоскости

Исследование динамики фокальной плоскости проводилось для различных КАН и в частности для «Аист-2D».

На представленных ниже графиках по оси ординат отложены значения в пикселях.

На рисунке 11 представлены две диаграммы параметров b_x поперечных смазов по швам №1 и №3. По оси абсцисс отложены номера строк изображения (масштабированное время).

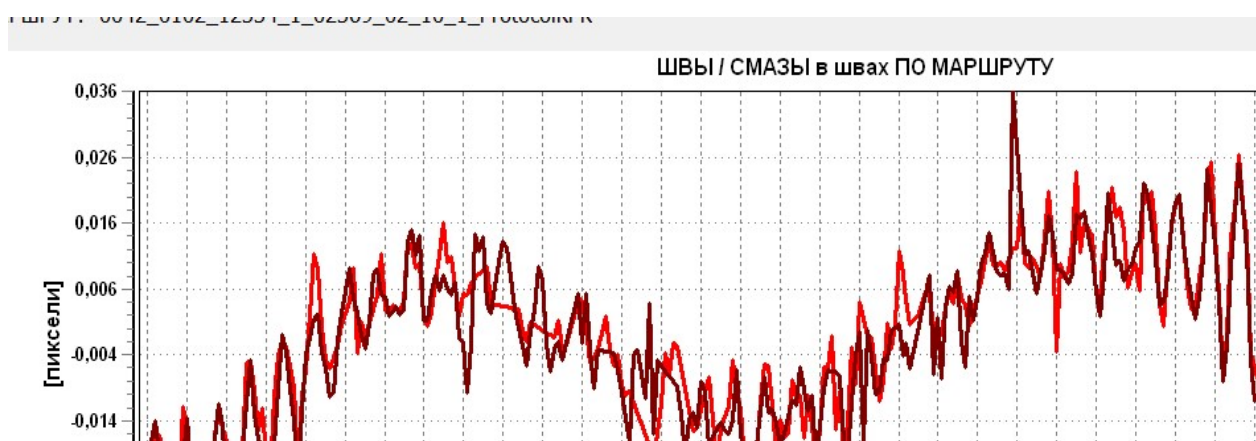


Рисунок 11 – Диаграммы параметров поперечных смазов на маршруте по швам №1 и №3

Отметим, что диаграммы на рисунке 11 изменяются в границах интервала $[-0,034, 0,036]$ пикселей, то есть на интервале длиной 0,07 пикселя и охваченный диаграммами интервал времени соответствует времени формирования 38000 строк изображения. Высокая степень совпадения диаграмм на столь длительном интервале времени косвенно подтверждает как их достоверность, так и высокую точности совмещения изображений, ранее не достижимую: шаг координатной сетки в вертикальном направлении равен 0,01 пикселя.

Проведен анализ амплитудного спектра этих колебаний (рисунок 12): по оси абсцисс отложена частота колебаний в Гц, по оси ординат - амплитуда продольной составляющей смаза, вызванного колебаниями ФП.

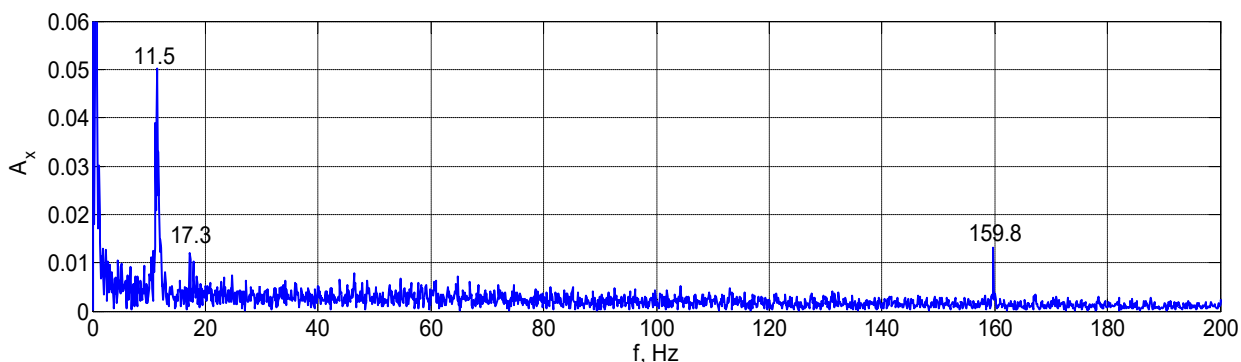


Рисунок 12 – Амплитудный спектр продольных колебаний ФП КАН;

Анализ причин появления на амплитудном спектре (рисунок 12) резонансных всплесков показал, что низкочастотные колебания вызваны управляющим воздействием со стороны системы управления движением КАН на маршруте съемки при отработке программы движения ФП. Частота 11,5 Гц. совпадает с собственной частотой колебаний солнечных батарей КАН. Частота 159,8 Гц. возникает из-за дисбаланса роторов силовых гироскопов, управляющих движением КАН.

Таким образом, разработанное ПО впервые в практике диагностики КАН обеспечило контроль колебаний и вибраций ФП в условиях орбитального полета, не реализуемых в условиях наземных испытаний.

Уточнение положения матриц ФПЗС на ФП

На основе видеоинформации, формируемой в зонах перекрытия матриц ФПЗС, оперативно решается задача уточнения относительного положения матриц в составе ОЭП.

На рисунке 13 показан пример эпюры распределения смазов изображения в продольном и в поперечном направлениях.

Видимое на рисунке 13 резкое отклонение эпюры параметров продольных смазов от идеального графика (прямая линия) указывает на значительные отклонения положения на ФП ФПЗС матриц с номерами от 2 до 8 от паспортных значений в продольном направлении.

Применение таких эпюр в сочетании с разработанной технологией виртуальной подвижки матриц позволяет с высокой точностью (лучше, чем 0,1 пикселя) определять для каждой пары смежных матриц:

- отклонения от проектных значений меж матричных перекрытий;
- отклонения от проектных значений меж матричных расстояний в продольном направлении.

Карты диспарантности и их применение в задаче обнаружения малоразмерных малоскоростных объектов

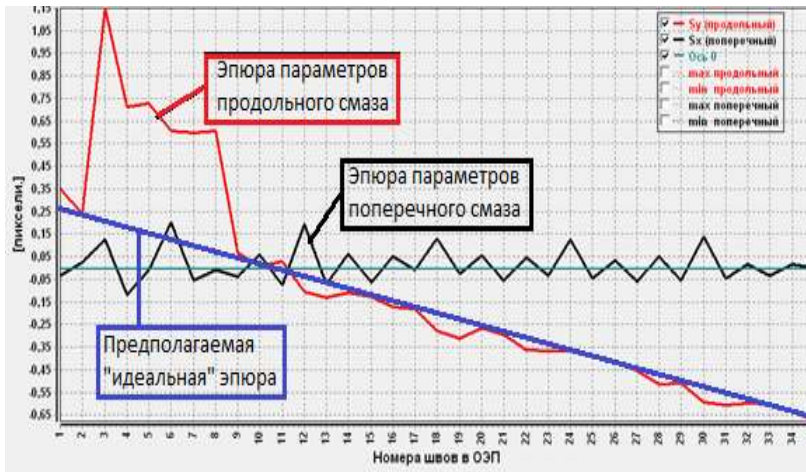


Рисунок 13 - Эпюры распределения смазов изображения по швам

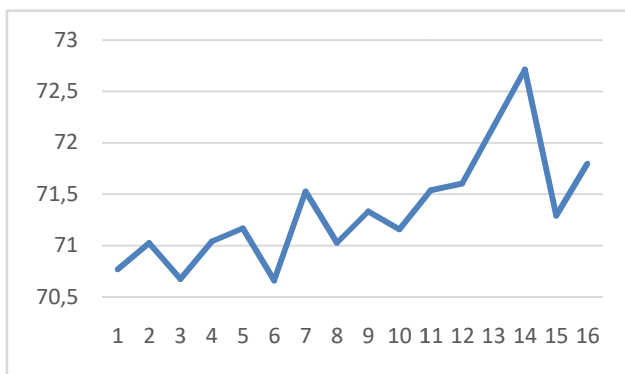
В диссертационной работе рассмотрено применение КД для решения задачи обнаружения малоразмерных малоскоростных объектов. На конкретном примере описана технология обнаружения групп малоразмерных (несколько пикселей на отдельный объект группы) малоскоростных объектов с применением

препарирования построенной КД.

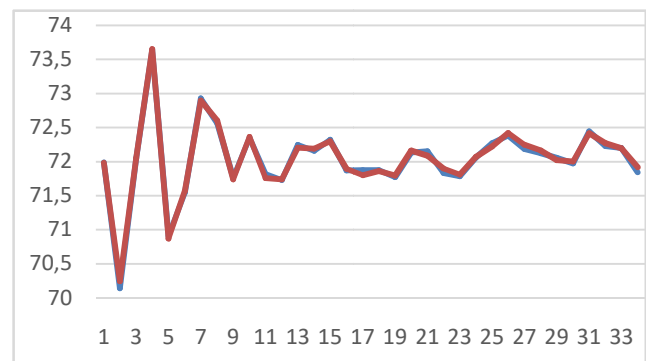
Голономные связи в компоновке ПЗС матриц

Выявлены голономные связи между парами швов, состоящих в том, что сумма мгновенной ширины этих швов (не обязательно соседних) есть константа и является инвариантом изображений в условиях такого движения ФП, когда на интервале времени пролета изображения от i -ой матрицы к $(i + 1)$ -ой скорость движения ФП практически постоянна. Такие пары швов будем называть *голономной парой*. Вектор, очередная компонента которого равна сумме ширины очередной пары соседних швов, назван *характеристическим вектор ОЭП*. Эксперименты показали, что характеристический вектор является инвариантом всех изображений, формируемых ОЭП вне зависимости от условий съемки и маршрута съемки. В силу такой инвариантности каждая его компонента равна сумме межматричных пересечений соответствующей пары смежных матриц.

На рисунке 14а представлена диаграмма характеристического вектора панхромного ОЭП КАН Аист-2D, полученного осреднением по 16 маршрутам.



а)



б)

Рисунок 14 – Примеры характеристических векторов двух панхромных ОЭП различных КАН

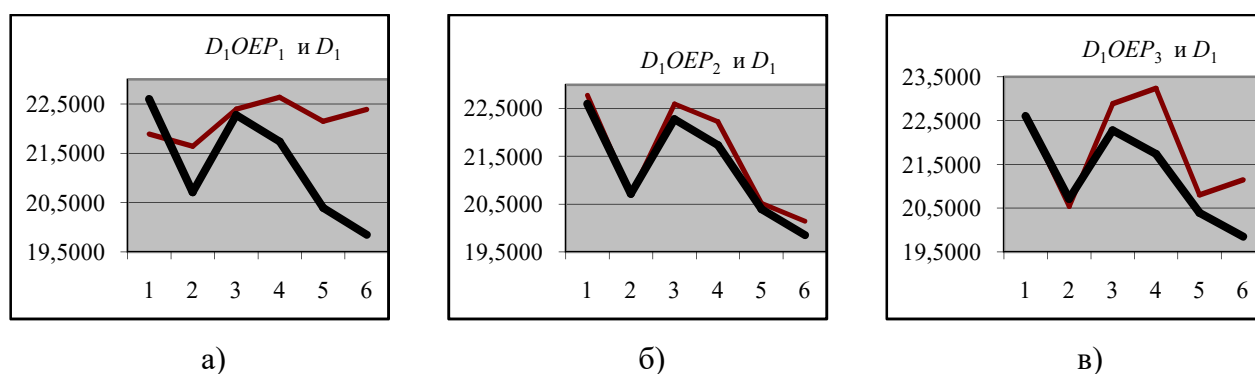
Относительно характеристического вектора панхромного ОЭП КАН Аист-2D получены следующие статистические оценки: СКО по всем компонентам вектора находятся в интервале $[0,0135, 0,0292]$ пикселей.

На рисунке 14б представлены диаграммы двух реализаций характеристического вектора панхромного ОЭП КАН типа «Ресурс», построенные по двум маршрутам, разнесенным по времени на 8100 витков. СКО по всем компонентам вектора находятся в интервале $[0,0249, 0,0982]$ пикселей.

Идентификации ОЭП по сформированному им изображению

В процессе эксплуатации КАН Ресурс-ДК1 сложилась нештатная ситуация: номер ОЭП указанный в файле-паспорте маршрута, формируемого для каждого маршрута, не вызывал доверия. Так появилась задача идентификации ОЭП, сформировавшего данное изображение. Задача была осложнена тем, что съемка маршрута, содержимое паспорта которого вызывало сомнения, выполнена в панхромном режиме.

В структуре КАН Ресурс-ДК1 было три ОЭП. Каждый из них состоял из 18 матриц, которые логически разделялись на три зоны компенсации (ЗК) по 6 матриц в каждой. Для решения задачи по видеоданным, для которых точно известны сформировавшие их ЗК, были построены 9 «эталонных» локальных характеристических векторов (ЛХВ). По представленным для исследования файлам видеоданных были построены 3 исследуемых ЛХВ. После этого для идентификации ОЭП осталось сравнить каждый из трех исследуемых ЛХВ с эталонными ЛХВ с целью выбора наиболее похожих пар ЛХВ, что можно сделать различными способами. Был выбран вариант визуализации сравниваемых ЛХВ в виде пар диаграмм. На рисунке 15 для краткости показаны пары диаграмм ЛХВ только для ЗК №1. Исследуемый ЛХВ повторен на каждой диаграмме. В результате по всем трем ЗК совпадения диаграмм указали на ОЭП №2. В файле-паспорте источником исследованных видеоданных был обозначен ОЭП №3.



- а) – исследуемый ЛХВ и эталонный ЛХВ ЗК №1 ОЭП №1;
 б) – исследуемый ЛХВ и эталонный ЛХВ ЗК №1 ОЭП №2;
 в) – исследуемый ЛХВ и эталонный ЛХВ ЗК №1 ОЭП №3;

Рисунок 13 – Сравнение исследуемого ЛХВ с эталонными ЛХВ трех ОЭП.

Приведенные диаграммы характеристических векторов показывают, что разработанная методика решения рассматриваемой задачи в сочетании с высокой точностью вычисления содержимого протоколов сшивки практически всегда позволяет идентифицировать ОЭП по сформированному им изображению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Заявленная цель диссертационной работы достигнута. Все задачи, поставленные для достижения цели, решены.

Предложена обобщенная математическая модель динамического изображения, связывающая перемещение изображения с векторным полем скоростей движения изображения (оптическим потоком), заданным на фокальной плоскости ИС. Модель отличается от известных моделей, основанных на предположении о постоянстве яркости фрагментов изображения при движении, тем, что допускает вариацию яркости во времени, а также сингулярности в оптическом потоке типа разрывов первого рода и отсутствия движения. Для частного случая достаточной гладкости оптического потока получена модель в виде дифференциального уравнения, которое названо уравнением движения изображения.

Получено обобщенное уравнение оптического потока, которое устанавливает связь параметров движения с измеримыми характеристиками изображений: характеристиками, вычисляемыми на подобластях изображения ненулевой площади, что отличает предложенный метод от известных «градиентных» методов, в которых используется вычисление оценок производных изображения по времени и пространству методом конечных приращений.

Впервые предложена методика вычисления измеримых характеристик изображений с использованием нормированных нелинейных обобщенных функций со сложным составным ядром, что позволило создать способы совмещения разнородных изображений, различающихся ракурсом, спектральным диапазоном, яркостью, контрастом.

Разработана основанная на метод функционализации методика высокоточного совмещения изображений, в том числе, изображений, глобальный экстремум автокорреляционной функции которых нечетко выражен (облака, поля, пустыни), и построения соответствующих карт диспарантности. Методика реализует компенсационный метод совмещения изображений и обеспечивает несмещенные оценки вектора оптического потока с недостижимой ранее субпиксельной точностью: получаемые оценки ошибок совмещения реальных изображений имеют значения менее 0,05 пикселя, в некоторых случаях менее 0,01 пикселя. На разнообразных сюжетах исследованы основные динамические свойства предложенной методики: устойчивость, сходимость. Показано, что поиск сопряженного фрагмента осуществляется не более, чем за 2-3 итерации даже при начальных смещениях

изображений, достигающих 100 пикселей и более. При совмещении спектрозональных изображений достигается показатель менее 1,3 итерации на одно удачное совмещение. Последующие итерации востребованы, когда начальные смещения приближаются к границам области притяжения. Получены оценки области притяжения (области сходимости) методики в пространстве начальных смещений изображений. Экспериментально подтверждена малая чувствительность предложенной методики к локальным экстремумам ВКФ обрабатываемых изображений, а также к их мультипликативным отличиям. Эти свойства методики определяют перспективность применения метода функционализации для реализации информационно-измерительной системы параметрической идентификации изображений, работающей в реальном времени.

Впервые предложена универсальная методика оценки погрешности совмещения разнородных изображений, инвариантная классу совмещаемых изображений и имеющая, в отличие от известных оценок скалярной формы, форму двухкомпонентного вектора, характеризующего значение модуля ошибки совмещения изображений по координатам координатной системы, в которой представлены изображения. Методика содержит универсальный критерий останова итерационной процедуры совмещения изображений, с высокой достоверностью отсеивающий ложные совмещения изображений с линеаменами и изображений, глобальный экстремум автокорреляционной функции которых нечетко выражен.

Впервые решена задача обнаружения малоразмерных объектов,двигающихся с малыми скоростями.

На основе разработанной методики обработки изображений впервые получены оценки частоты и амплитуды колебаний и вибраций фокальной плоскости КАН, что впервые в практике диагностики КАН открывает возможности контроля таких колебаний и вибраций в условиях орбитального полета, не реализуемых в условиях наземных испытаний.

Выявлен и формализован характеристический вектор многоматричного оптико-электронного преобразователя как инвариант всех изображений, формируемых преобразователем, и позволяющий оперативно в условиях орбитального полета оценивать геометрические параметры взаимного позиционирования матриц приборов с зарядовой связью в составе такого оптико-электронного преобразователя. На основе характеристического вектора впервые в практике космических исследований решена задача идентификации оптико-электронного преобразователя по сформированному им изображению.

Предложена технология виртуальной подвижки фоточувствительных матриц, позволяющая оценивать отклонения взаимного расположения матриц от проектных параметров как в продольном, так и в поперечном направлениях. Поэтому эта технология может быть использована в процессе аттестации точности взаимного позиционирования матриц в составе МОЭП и позволяет оперативно отслеживать возможные подвижки матриц на ФП в процессе эксплуатации КАН.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в международных изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus

1. Kuznetsov, P. K., Identification of the spatial motion kinematic parameters for a passive space vehicle by its image analysis/ P. K. Kuznetsov, **B.V. Martemyanov** // AIP Conference Proceedings. – 2018. - V. 2046. - P. 020054; doi: 10.1063/1.5081574.
2. Kuznetsov, P. K. New Method of Optical Flow Evaluation / P. K. Kuznetsov, **B.V. Martemyanov** // Proc. 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems 29 - 31 May 2017. - Saint Petersburg, Russia. - 2017. P. 27-31. ISBN 978-5-91995-044-8.
3. Anshakov, G.P. and other. Recovery of Non-Visual Data From Images Acquired by Land-Survey Satellites/ G.P. Anshakov, G.N. Myatov, A.A. Yudakov, P. K. Kuznetsov, **B.V. Martemyanov**// Proc. 25th Anniversary Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems 28 - 30 May 2018. - Saint Petersburg, Russia. – 2018. – P. 480-487.

Статьи в изданиях из перечня, рекомендуемого ВАК РФ

1. Кузнецов, П.К. Метод определения вектора скорости движения подстилающей поверхности/ П.К. Кузнецов, **Б.В. Мартемьянов**, В.И. Семавин, Е.Ю. Чекотило // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – Самара: СамГТУ. - 2008. - №2 (22). – С. 96-110.
2. **Мартемьянов Б.В.** Оценка качества алгоритма сшивки изображений, основанного на методе функционализации / Б.В. Мартемьянов // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – Самара: СамГТУ. – 2009. – № 3 (25). – С.88-95.
3. Кузнецов, П.К. Исследование сходимости итерационной процедуры определения параметров движения изображений методом функционализации/ П.К. Кузнецов, **Б.В. Мартемьянов**, В.И. Семавин, Е.Ю. Чекотило // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – Самара: СамГТУ. - 2010. - №2 (26). – С. 80-85.
4. Кузнецов, П.К. Самонастраивающийся алгоритм высокоточного совмещения аффинно-преобразованных изображений/ П.К. Кузнецов, **Б.В. Мартемьянов**, Е.Ю. Чекотило // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – Самара: СамГТУ. - 2011. - №1 (29). – С. 92-100.
5. **Мартемьянов Б.В.** Метод отождествления многоматричной видеокамеры с полученными ею снимками / Б.В. Мартемьянов // Информационно-управляющие системы. – Санкт-Петербург. - №6 (55). - 2011. – С.11-15.
6. Кузнецов, П.К. Методика высокоточной сшивки изображений, получаемых при съемке обстановки многоматричным сканирующим оптико-электронным преобразователем / П.К. Кузнецов, **Б.В. Мартемьянов**, В.К.

Скирмунт, В.И. Семавин // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. - Самара: СамГТУ. - 2011. - № 3 (31). - С. 69-81.

7. **Мартемьянов Б.В.** Голономная коррекция в задаче сшивки полос изображений, полученных многоматричным оптико-электронным преобразователем / Б.В. Мартемьянов // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – Самара: СамГТУ. – 2012. - №3 (35). – С.75-83.

8. Кузнецов, П.К., Техническое зрение подвижных объектов. Метод анализа поля скоростей динамического изображения / П.К. Кузнецов, **Б.В. Мартемьянов**, В.И. Семавин // М.: Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2014. - №1. - С. 3-9.

9. Кузнецов, П.К. Техническое зрение подвижных объектов. Совмещение изображений как динамический процесс/ П.К. Кузнецов, **Б.В. Мартемьянов**, В.И. Семавин // М.: Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2014. - №2. - С. 3-10.

10. Кузнецов, П.К. Техническое зрение подвижных объектов. Методика совмещения изображений, полученных при наблюдении с подвижного основания / П.К. Кузнецов, **Б.В. Мартемьянов**, А.В. Ращупкин // М.: Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2014. - №3. - С.10-17.

11. Кузнецов, П.К. Математическая модель формирования видеоданных, получаемых с использованием сканирующей съемки / П.К. Кузнецов, **Б.В. Мартемьянов** // Известия Самарск. научн. центра РАН, №6 (16). - 2014. – С. 292-299.

12. Кузнецов, П.К. Применение протоколов сшивки полос изображений, формируемых много матричными оптико-электронными преобразователями/ П.К. Кузнецов, **Б.В. Мартемьянов**, Г.Н. Мятлов, А.А. Юдаков // Вестник Самарск. ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2017. - №3 (16). С. 185 – 196. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-3-185-196.

Патент

13. Пат. RU 2524441 С2 Рос. Федерация, МПК G01P 3/36 (2006.01). Устройство для измерения вектора скорости движения изображения объекта со случайным распределением яркостей/ П.К. Кузнецов, **Б.В. Мартемьянов**, В.И. Семавин.; заявитель и патентообладатель Самарск. гос. техн. ун-т. - № 2012118021/28 (027180); заявл. 02.05.2012; опубл. 27.07.2014, Бюл. №31.

Свидетельство

14. № 2017662089 «Программный комплекс для определения параметров движения автономной мобильной платформы АМП»// Правообладатель: ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет (RU); Авторы: Кузнецов П.К., **Мартемьянов Б.В.**, Шестов Р.В. / Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27 октября 2017 г.

Разрешено к печати диссертационным советом Д 212.217.07
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 5 от 25 сентября 2019 г.)
Заказ № . Формат 60x84 1/16. Бумага тип. №1.
Отпечатано на ризографе. уч.-изд. л. 1,15. Тираж 120 экз.
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Отдел типографии и оперативной печати
443100, г. Самара, Молодогвардейская ул. 244, Главный корпус.