

На правах рукописи

Парфентьев Кирилл Викторович

**АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ
ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕГМЕНТАЦИОННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

Специальность: 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Неусыпин Константин Авенирович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор, руководитель отдела Управления робототехническими устройствами ФИЦ ИУ РАН Дивеев Асхат Ибрагимович кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной геодезии МИИ-ГАиК, Куприянов Андрей Олегович
Ведущая организация:	Акционерное общество Московский научно-производственный комплекс «Авионика» имени О.В. Успенского

Защита состоится «25» апреля 2023г. года в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.14 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по адресу 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент

Муратов Игорь Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена растущим спросом на беспилотные летательные аппараты (БЛА) и несовершенством широко применяемых методов навигации. Растущий спрос на БЛА обоснован не только экономическими соображениями, а именно, относительной дешевизной конструкции, но и возможностью выполнять задачи повышенного риска. БЛА применяются в боевых действиях, сельском хозяйстве, фотограмметрии, при мониторинге пожаров, месторождений полезных ископаемых, автомобильного трафика. Однако для решения всех этих задач и корректного функционирования БЛА необходима надежная и точная система навигации.

К недостаткам наиболее распространенных в настоящее время спутниковых навигационных систем можно отнести ошибки, вызываемые «многолучевостью», которая вызвана многократными переотражениями сигнала со спутника от окружающих предметов и поверхностей до того, как сигнал попадает в антенну приемника и дифракцией на небольших объектах, находящихся на пути радиолуча, соизмеримых с длиной волны. При этом радиолуч проходит по другому пути, что вызывает изменение его амплитуды и фазы. Другим фактором, ухудшающим результаты спутниковых измерений, могут также стать помехи от близко расположенных мощных источников радиоизлучений: локаторов, теле- и радиопередающих станций. Другой проблемой является, что сигнал, поступающий приемник спутниковой навигационной системы можно исказить. Спуфинг-атака на глобальные системы спутниковой навигации— атака, которая пытается обмануть приемник, широкоэвещательно передавая немного более мощный сигнал, чем полученный от спутников, такой, чтобы быть похожим на ряд нормальных сигналов. Эти имитирующие сигналы изменены таким способом, чтобы заставить получателя неверно определять своё местоположение, считая его

таким, какое отправит атакующий. Таким приемом БЛА можно сбить или даже перехватить.

Обладающие такими достоинствами, как автономность и надежность, инерциальные навигационные системы тоже не лишены недостатков, главными из которых является неограниченное накопление методической ошибки и ошибки, связанной с изначальной калибровкой системы. Для устранения этого недостатка применяют физические и алгоритмические методы. Но в первом случае система частично теряет преимущества, связанные с простотой конструкции и компактностью: этот метод предполагает помещение системы на гироплатформе, датчики которой используются как для стабилизации приборов, так и для навигации. Во втором случае частично теряется автономность инерциальной навигационной системы, поскольку происходит ее совмещение с другими способами навигации. Такие навигационные системы называются интегрированными.

Частично эти недостатки устраняются комбинированными навигационными системами, в которых происходит комплексирование информации, поступающей с инерциальной и спутниковой навигационных систем.

Другим подходом к решению задачи определения местоположения БЛА является анализ подстилающей поверхности на основе цифровых изображений, полученных в различных спектральных диапазонах. Основной проблемой в построении моделей подстилающей поверхности являются изменчивые условия съемки, такие как освещенность, осадки, угол и высота съемки. В рамках работы исследованы технологии построения моделей подстилающей поверхности с использованием различных технических (оптических и радарных) и программных средств.

Степень разработанности темы исследования. В работах отечественных и зарубежных авторов встречаются теоретические и

методологические разработки, охватывающие важные аспекты изучаемой области. Научные основы методов выделения границ на изображениях, основанных на разнице градиентов, заложены в работах Л. Робертса (Lawrence Gilman Roberts), Д. Прюитта (Judith Prewitt), И. Собеля (Irwin Sobel), Г. Фелдмана (Gary Feldman), Д. Кэнни (англ. John F. Canny), В.А. Ковалевского и других ученых. Методы выделения границ, основанные на разнице гауссианов исследовались в работах Г. Канга (Henry. Kang), С. Ли (Seungyong Lee), Ч. Чуи (Charles K. Chui), Я. Киприанидиса (Kyprianidis Jan Eric), Ю. Дольнера (Jürgen Döllner). В работах авторов П. Арбелаеса (Pablo Arbelaez), М. Майера (Michael Maire), Р. Сяофенга (Ren Xiaofeng), Л. Бо (Liefeng Bo) рассматривались методы выделения границ, основанные на мультимасштабных функциях.

Основы глубокого обучения были заложены в работах А.Г. Ивахненко, В.Г. Лапы, Р. Дехтер (Rina Dechter), К. Фукусимы (Kunihiko Fukushima), Я. Лекуна (Yann LeCun).

Применение алгоритмов глубокого обучения в задачах сегментации изображений были описаны в работах Г. Ванга (Guotai Wang), В.К. Говиндана (V. K. Govindan), Е. Шелхамера (Evan Shelhamer), Д. Лонга (Jonathan Long), О. Роннербергера (Olaf Ronneberger), Ф. Фишера (Philipp Fischer), Т. Брокса (Thomas Brox).

Анализ существующих отечественных и зарубежных работ в области цифровой обработки изображений показал, что требуется их дальнейшее развитие и совершенствование в части разработки алгоритмов выделения границ с учетом специфики мультиспектральных изображений, что **обуславливает актуальность** темы исследования.

Объект исследования. В качестве основного объекта исследования в диссертации рассматривается система технического зрения, получающая цифровую модель подстилающей поверхности при использовании сенсоров различного спектрального диапазона.

Целью работы является разработка и исследование алгоритмов определения местоположения и курса БЛА на основе данных, полученных с сенсоров различного спектрального диапазона.

Задачи исследования: 1. Разработка алгоритма выделения границ, адаптированного под построение моделей подстилающей поверхности в различных спектральных диапазонах. 2. Разработка структуры искусственной нейронной сети для коррекции изображений, получаемых методом выделения границ. 3. Обучения искусственной нейронной сети и комплексирование данных, полученных с сенсоров различного спектрального диапазона. 4. Разработка алгоритма коррекции полученной нейронной сети в реальном времени под изменчивые условия съемки. 5. Определение местоположения и курса БЛА на основе полученных с искусственной нейронной сети данных, используя алгоритмы выделения признаков.

Соответствие паспорту научной специальности. Область исследования соответствует направлениям исследования специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем: 1. Предложен модифицированный алгоритм выделения границ, адаптированный для изображения подстилающей поверхности в различных спектральных диапазонах. 2. Построена нейросетевая модель, содержащая слои свертки, деconvолуции и сегментации и способная решать задачу коррекции полученных изображений. 3. Предложенная нейросетевая модель адаптирована для комплексирования данных, полученных, как с разных датчиков, так и разными алгоритмами обработки. 4. Добавлена возможность корректировать весовые коэффициенты нейросетевой модели в процессе полета БЛА, что может позволить включать ее в контур системы управления.

Практическая значимость результатов исследования. Разработаны алгоритмы построения моделей подстилающей поверхностей, инвариантных к условиям съемок. Решена задача комплексирования данных, полученных с

датчиков разных спектральных диапазонов. Предложен алгоритм коррекции для получения моделей подстилающей поверхности в режиме реального времени. На основании полученных моделей решены задачи определения местоположения, включая высоту, скорости и курса. Разработанные алгоритмы определения навигационных параметров по изображению подстилающей поверхности могут быть реализованы в системах по сбору информации с сенсоров широкого спектрального диапазона для отечественных автономных летательных аппаратов ударного типа.

Достоверность и обоснованность научных положений и результатов подтверждены корректным использованием математических методов, моделей и алгоритмов, а также достаточным объемом численного моделирования и полученными непротиворечивыми результатами.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертации использованы для разработки программного обеспечения производителей военной и гражданской техники высокотехнологичными решениями в таких авиационных предприятиях, как ЗАО «Инерциальные технологии «Технокомплекса» и НИИ «ИСУ» МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также в учебном процессе на кафедре «Системы автоматического управления» факультета «Информатика и системы управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках дисциплин «Нейросетевые технологии в задачах системного анализа», «Цифровая обработка сигналов», «Методы и технологии искусственного интеллекта», «Системы распознавания образов», «Методы и технологии машинного обучения».

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы цифровой обработки сигналов, технологии искусственных нейронных сетей, алгоритмы компьютерного зрения, системный анализ, методы математического моделирования и программный пакет MATLAB.

Основные научные результаты, полученные в ходе исследования лично автором и выносимые на защиту. 1. Разработанный алгоритм обработки изображений позволяет выделять границы в задаче построения моделей

подстилающей поверхности, в том числе за пределом видимого спектрального диапазона. 2. Применение сегментационных нейросетевых технологий позволило скорректировать полученные модели подстилающей поверхности. 3. Комплексирование данных, полученных с сенсоров различного спектрального диапазона и в результате цифровой обработки изображений. 4. Коррекция нейросетевой модели в процессе полета БЛА позволяет обеспечить адекватность получаемых навигационных параметров.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждены на следующих конференциях, симпозиумах и семинарах: Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства (2014-2022 гг.); II международной научно-практической конференции, посвящённой 105-летию со дня рождения адмирала флота СССР дважды героя Советского Союза Сергея Георгиевича Горшкова (2018); Мультиконференции по проблемам управления УМАС (2014, 2016); Одиннадцатом международном симпозиуме «Интеллектуальные системы»; научном семинаре кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2021 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 29 научных работ, из них 5 статей в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, 2 статьи, индексируемые в базе Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Текст диссертации изложен на 153 машинописных страницах, содержит 44 рисунка. Список литературы включает 313 наименований работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации рассмотрены современное состояние БЛА, типы, тенденции, экономическое обоснование, перспективы развития, сферы применения.

Рассмотрены навигационные системы, их погрешности и особенности функционирования. Представлены спутниковые и инерциальные навигационные системы и их недостатки и достоинства. Рассмотрены слабосвязанные и сильносвязанные системы комплексирования навигационной информации. Представлен обзор основных работ в области комплексированных навигационных систем. Обоснован выбор в пользу анализа подстилающей поверхности на основе цифровых изображений. Приведен обзор существующих работ в данной области.

Во второй главе диссертации рассмотрены различные мультиспектральные методы построения изображений. Описаны технологии получения изображений с лидаров, радиолокаторов, оптических камер, инфракрасных камер, видеоспектрометров. Для каждой из технологий представлены достоинства, недостатки, примеры использования. Приведены примеры мультиспектральных оптико-электронных комплексов. Произведена оценка влияния метеорологических условий, времени дня и года на использование оптических датчиков. Рассмотрены примеры комплексирования датчиков различного спектрального диапазона при решении задач технического зрения. Произведен обзор использования датчиков различного спектрального диапазона на БЛА различного назначения.

В третьей главе диссертации рассмотрены известные методы выделения границ: оператор Робертса, оператор Собеля, оператор Кэнни. Выявлены достоинства и недостатки этих подходов. На их основе предложен модифицированный подход к выделению границ на цифровых изображениях. Алгоритм содержит следующие шаги: перевод изображения в полутонное и гауссова фильтрация изображения, получение градиентного изображения, поро-

говая фильтрация в зависимости от числа градаций и типа изображения, медианная фильтрация нечетным размером окна для сохранения числа градаций яркости.

Главным отличием от известных алгоритмов является шаг пороговой фильтрации. Основная идея заключается в том, что в известных подходах пороги выбираются либо автоматически, либо пользователем. В предложенном алгоритме выбираются пороги для каждого типа изображения (оптическое, радарное, инфракрасное, лидарное) на основе анализа тысяч снимков. Выбраны они таким образом, чтобы границы отрисовывались там и только там, где они действительно нужны, а не на основании, что изображение должно содержать какое-то количество границ. Другим достоинством данного подхода является то, что вместо традиционного выбора граница-фон, можно выбирать и некоторые полуграницы, что может позволить избежать серьезных ошибок. Сравнение известных алгоритмов с предложенным приведено в Таблице. 1.

Таблица. 1.

Сравнение алгоритмов выделения границ на оптических изображениях

Метод	Оператор Робертса	Оператор Собеля	Оператор Кэнни	Предложенный алгоритм, 2 градации	Предложенный алгоритм, 3 градации	Предложенный алгоритм, 8 градации
Средняя ошибка	0.14	0.136	0.112	0.109	0.076	0.078

Ошибка считается как средняя попиксельная разница из двух изображений. Как видно из таблицы, алгоритм показывает эффективные результаты по сравнению с известными подходами, порядка 2.7% для двух градаций и до 37.5% для 4 градаций.

Еще большую эффективность алгоритм показывает на изображениях, полученных в других спектральных диапазонах. Сравнение известных алгоритмов с предложенным для радарных снимков приведено в Таблице. 2.

Таблица. 2.

Сравнение алгоритмов выделения границ на радарных изображениях

Метод	Оператор Робертса	Оператор Собеля	Оператор Кэнни	Предложенный алгоритм, 2 градации	Предложенный алгоритм, 4 градации	Предложенный алгоритм, 8 градации
Средняя ошибка	0.297	0.284	0.243	0.173	0.168	0.178

Как видно из таблицы, для радарных снимков алгоритм показывает еще более эффективные результаты по сравнению с известными подходами, порядка 28.8% для двух градаций яркости.

Также алгоритм прекрасно себя проявил на лидарных и инфракрасных снимках, где тоже есть заметные улучшения по сравнению с известными подходами. На основании полученных результатов как оптимальное число, было выбрано 4 градации яркости.

В четвертой главе диссертации рассмотрены нейросетевые подходы к обработке изображений. Как известно, в настоящее время активно применяются различные сверточные нейросетевые модели. Такие модели обладают рядом достоинств, например, они позволяют выделять различные линии и контуры на изображениях. Но не вполне применимы для данной задачи, так как для решения задачи классификации требуются десятки тысяч примеров.

На основе сверточных нейросетевых моделей была создана сеть автокодировщика или автоэнкодера, нейронная сеть, которая копирует входные данные на выход. Данная модель, как и сверточная, сначала уменьшает размер исходного изображения, а затем, с помощью так называемых «разверточных слоев» преобразует изображение в исходный размер. Цель - получить на выходном слое отклик, наиболее близкий к входному. Такие сети могут применяться для сжатия информации или для фильтрации.

На основе операций свертки и развертки в 2015 году была предложена модель U-net, которая помимо указанных слоев, еще и имеет сегментационный слой или сегментационную карту. Эта сеть была создана для решения задачи сегментации биомедицинских снимков.

На основе данных моделей была создана ациклическая направленная сеть, состоящая из 58 слоев (Рис.1).

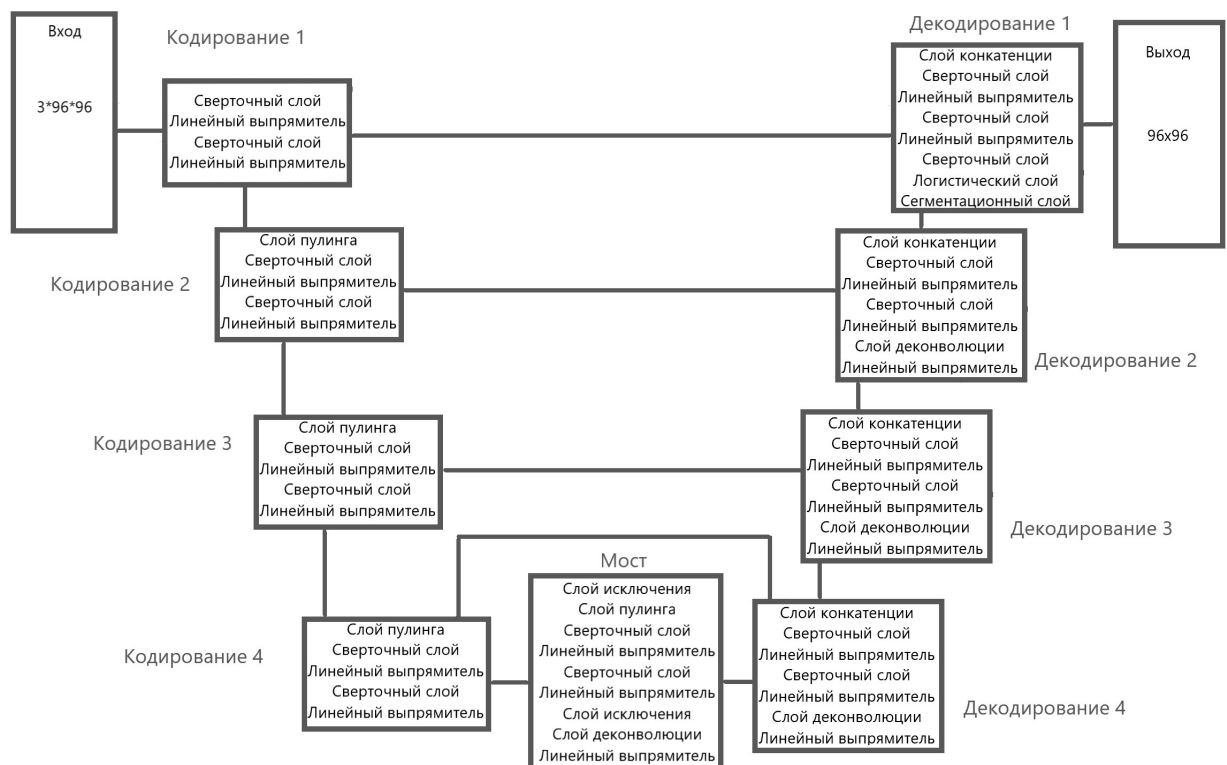


Рис.1. Нейросетевая модель для обработки снимков подстилающей поверхности

В представленной модели для наилучшего извлечения информации параллельно происходят разные уровни кодирования-декодирования (свертки-развертки), после эти слои объединяются и поступают на слой сегментации. В данной интерпретации слой сегментации решает задачу классификации для каждого пикселя, к какой градации яркости его отнести (фон-граница-полуграница). Количество классов сегментации зависит от количества градаций алгоритма выделения границ на изображении.

Нейросетевая модель позволила улучшить уже полученные после алгоритма выделения границ изображения (Таблица. 3).

Таблица. 3.

Нейросетевая обработка для оптических снимков

Метод	Алгоритм выделения границ, 2 градации	Нейросетевая обработка, 2 градации	Алгоритм выделения границ, 4 градации	Нейросетевая обработка, 4 градации
Средняя ошибка	0.109	0.099	0.07	0.062
Улучшение	-	9.2%	-	11.4%

Схожие результаты были получены и обработки изображений в других спектральных диапазонах.

Для дальнейшего улучшения результатов использовалось комплексирование данных – на вход нейронной сети поступали исходное изображение, градиентное изображение и изображение в 4 градациях яркости. Результаты представлены в Таблице. 4.

Таблица. 4.

Комплексирование входов нейронной сетью

Входная информация	Полутонное изображение	Полутонное и градиентное изображения	Полутонное, градиентное и контурное изображения
Средняя ошибка	0.062	0.054	0.052
Улучшение	-	12.3%	16.5%

Кроме того, возможно комплексирование данных, полученных с датчиков разных спектральных диапазонов. В Таблице.5 представлены результаты, полученные при комплексировании радарных и оптических снимков.

Таблица. 5.

Комплексирование оптических и радарных снимков

Метод	2 градации, вход изображение с радара	2 градации, вход изображение с радара и оптической камеры	4 градации, вход изображение с радара	4 градации, вход изображение с радара и оптической камеры
Средняя ошибка	0.131	0.099	0.13	0.05
Улучшение	-	24.4%	-	61.5%

В пятой главе диссертации рассмотрены алгоритмы выделения признаков на изображениях. Эти алгоритмы просты, быстро работают, обладают устойчивостью к изменению масштаба и угла.

Сравнение алгоритмов выделения признаков в задаче определения местоположения по изображению подстилающей поверхности приведено в Таблице.6.

Таблица. 6.

Сравнение алгоритмов выделения признаков в задаче определения местоположения по изображению подстилающей поверхности.

Метод	Среднее время работы, с	Среднее количество найденных ключевых точек	Среднее количество совпавших ключевых точек	Правильно найденные фрагменты, %
MSER	0.269	105	69	52
Харрис	0.046	2.2	2.1	75
KLT	0.049	4.6	4.6	100

FAST	0.034	4.6	4.6	100
SURF	0.041	88.2	50.5	55
ORB	0.119	1.5	1.4	59

Также предложен и протестирован программный продукт для снимков, полученных с борта беспилотного летательного аппарата оптической камерой. Алгоритм выглядит следующим образом:

1. Заранее была подготовлено изображение карты местности. Оно было обработано алгоритмов выделения границ и были выявлены особые точки методом выделения признаков. Также была обучена искусственная нейронная сеть, но не на снимках, которые будут подавать с борта БЛА, а на спутниковых снимках.
2. Текущее изображение подстилающей поверхности масштабировалось согласно данным высотомера или данным, полученной с предыдущей итерации, из него получалось три изображения – полутоновое, градиентное и пороговое, обработанное алгоритмом выделения границ.
3. Изображения поступали на вход искусственной нейронной сети, получалось результирующее изображение, которое сравнивалось методом выделения признаков с картой.
4. Определялось местоположение в пикселях, разница масштабирований и поворот. Из этих параметров определялись курс, географические координаты и уточнялся масштаб.
5. Полученное уточненное изображение подстилающей поверхности поступает на дообучение искусственной нейронной сети. Один пример, одна эпоха, весовые коэффициенты незначительно изменяются.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Рассмотрены современное состояние БЛА, типы, тенденции, сферы применения. Представлены наиболее распространенные навигационные системы, их погрешности и особенности функционирования. Рассмотрены способы получения изображения подстилающей поверхности и методы выделения границ, предложен свой подход. Представлена нейросетевая структура улучшающая изображения после выделения границ. Проведено моделирование на снимках, полученных с борта БЛА. Таким образом, в процессе диссертационного исследования были получены следующие основные результаты:

1. Разработан алгоритм выделения границ, адаптированный под построение моделей подстилающей поверхности в различных спектральных диапазонах. Относительно известных алгоритмов улучшение составляет от 3 до 29% в зависимости от спектрального диапазона изображения.

2. Предложена структура искусственной нейронной сети для коррекции изображений, получаемых методом выделения границ. Данная нейросетевая обработка позволила улучшить инвариантность изображений еще от 9 до 26% относительно результатов после выделения границ.

3. Искусственная нейронная сеть обучена на данных различного спектрального диапазона. Предложен подход к комплексированию данных, который позволил улучшить результаты еще на 12% при использовании только по-разному обработанных изображений и до 74% при использовании изображений разного спектрального диапазона.

4. Предложен алгоритм коррекции полученной нейронной сети в реальном времени под изменчивые условия съемки.

5. Предложен подход к получению географических координат, курса и коррекции данных высотомера при помощи выделения признаков на изображении.

6. Произведено моделирование на основе данных, полученных с борта БЛА. На основе анализа снимков получены географические координаты, курс и скорректирован масштаб. Также были скорректированы весовые коэффициенты искусственной нейронной сети.

Список ключевых опубликованных работ по теме диссертации за последние 5 лет.

1. Парфентьев К. В., Гаврилов А. И. Построение моделей подстилающей поверхности на основе реконструкции данных мультиспектрального мониторинга //Вестник евразийской науки. 2017. Т. 9. №. 6 (43). С. 141. (0.4 п.л./0.2 п.л.).
2. Парфентьев К. В., Жильцов А. И. Разработка интеллектуальной системы оценки состояния беспилотного летательного аппарата на основе нейросетевых технологий //Радиостроение. 2018. №. 2. С. 13-28. (0.9 п.л./0.45 п.л.).
3. Парфентьев К. В., Жильцов А. И. Создание интеллектуальной системы оценки состояния беспилотного летательного аппарата //Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем. 2018. С. 297-302. (0.3 п.л./0.15 п.л.).
4. Gavrilov A. I., Zhiltsov A. I., Parfentiev K. V. Using neural networks for monitoring UAV condition //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2019. Т. 2171. №. 1. С. 110001. (0.4 п.л./0.2 п.л.).
5. Пименова М. Б., Парфентьев К. В. Обнаружение и отслеживание положения центроида объекта в видеопотоке //Будущее машиностроения России. 2020. С. 113-116. (0.2 п.л./0.1 п.л.).

6. Львов М. И., Парфентьев К. В. Использование системы распознавания образов в работе бортового оптикоэлектронного прибора //Будущее машиностроения России. 2020. С. 110-113. (0.2 п.л./0.1 п.л.).
7. Пименова М. Б., Парфентьев К. В. Обнаружение движущихся объектов в кадре по методу вычисления оптического потока Лукаса-Канаде //Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. №. 1. С. 34-39. (0.4 п.л./0.2 п.л.).
8. Gavrilov A. I., Parfentiev K. V. Solving the problem of autonomous navigation using underlying surface models tolerant to survey conditions //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2021. Т. 2318. №. 1. С. 130001. (0.4 п.л./0.2 п.л.).
9. Парфентьев К.В. Определение местоположения летательного аппарата по изображению подстилающей поверхности //Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2022. №. 8. С. 1-5. (0.3 п.л.).
10. Парфентьев К.В., Неусыпин К.А. Построение моделей подстилающей поверхности с использованием сегментационных нейронных сетей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2022. №. 7. С. 13-17. (0.3 п.л./0.15 п.л.).
11. Парфентьев К.В., Неусыпин К.А. Построение моделей подстилающей поверхности с использованием сегментационных нейронных сетей //Проблемы экоинформатики. 2022. С. 87-89. (0.2 п.л./0.1 п.л.).