

*На правах рукописи*



**ПАВЛОВ Олег Вячеславович**

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В АВИАЦИОННЫХ  
НАШЛЕМНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ**

Специальность 05.11.16–«Информационно-измерительные  
и управляющие системы (в технических системах)»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» (РГРТУ) на кафедре «Электронные вычислительные машины»

Научный руководитель: **Никифоров Михаил Борисович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
зам. зав. кафедрой «Электронные вычислительные  
машины» ФГБОУ ВО «Рязанский государственный  
радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина»

Официальные  
оппоненты: **Бусурин Владимир Игоревич**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Системы автоматического и  
интеллектуального управления» ФГБОУ ВО  
«Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»

**Акименко Татьяна Алексеевна**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Робототехника и автоматизация  
производства» ФГБОУ ВО «Тульский  
государственный университет»

Ведущая  
организация: ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева–КАИ»

Защита диссертации состоится 11 октября 2019 г. в 12:00 ч. на заседании диссертационного совета Д.212.211.04 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ» и на сайте [www.rsreu.ru](http://www.rsreu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент



Г.В. Овечкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Одной из составных частей бортового радиоэлектронного оборудования современных самолетов и вертолетов являются нашлемные информационно-управляющие системы (НИУС), объединяющие функции защитного шлема, отображения визуальной информации, выдачи целеуказания, управления оптико-электронными системами и вооружением.

Проблемы разработки НИУС носят комплексный характер и объединяют сферы оптики, электроники, цифровой обработки сигналов и изображений, новейших конструкционных материалов и технологий. Ключевыми элементами НИУС являются нашлемный дисплей и система определения пространственной ориентации шлема, называемая также системой позиционирования (СП).

Для решения задач целеуказания, прицеливания и пилотирования летательного аппарата (ЛА) СП должна обеспечивать определение направления визирования летчика путем непрерывного отслеживания ориентации головы в шлеме в системе координат ЛА и выдачи угловых координат положения шлема в бортовой вычислитель.

Известны способы определения положения подвижных объектов на основе измерения характеристик магнитного поля, акустических измерений, принципов инерциальной навигации, геометрического анализа изображения реперных элементов на поверхности объекта.

Предъявляемые к СП современных НИУС высокие технические требования по диапазону и динамике рабочих перемещений шлема, погрешности измерения, помехоустойчивости, габаритам и массе нашлемной части, с одной стороны, и наличие определенных ограничений, свойственных различным методам измерений, с другой, не позволяют реализовать СП, удовлетворяющую всей совокупности требований с применением какого-то одного физического принципа. Так, например, СП, основанная на электромагнитном принципе, обладает широким диапазоном рабочих перемещений, но низкими помехоустойчивостью и стабильностью, а СП, основанная на оптико-электронном принципе, может иметь высокую точность, но в ограниченном диапазоне рабочих перемещений.

Ключом к решению проблемы может стать объединение в одной СП нескольких подсистем, основанных на различных физических принципах, что позволит компенсировать недостатки одних подсистем преимуществами других.

**Степень разработанности темы.** Исследованию научно-технических вопросов в области создания СП подвижных объектов посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых и исследователей. Существенный вклад в развитие этого направления внесли Алпатов Б.А., Степашкин А.И., Балашов О.Е., Желамский М.В., Сычевский С.Е., Буяков В.А., Бурдыгин А.И., Нечаев А.И., Глущенко В.Т., Луканцев В.Н., Пешехонов В.Г., Коркишко Ю.Н., Челноков Ю.Н., а также O. Faugeras, R. Hartley, A. Zisserman, Z. Zhang, S. Prince, R. Szeliski, M. Fischler, R. Bolles, R. Haralick, B. Horn, E. Foxlin, V. Lepetit, S. Li, C. Xu, R. Mahony, S. Madgwick.

Большую активность на рынке СП для систем виртуальной и дополненной реальности, а также для нашлемных систем авиационных тренажеров и боевых ЛА проявляют фирмы Ascencion Technology (США), POLHEMUS (США), Intersence (США), Thales Visionix (США), Elbit Systems (Израиль), Airbus DS Optronics (ЮАР).

Состояние разработки и внедрения отечественных авиационных НИУС и входящих в их состав СП нельзя считать удовлетворительным. В настоящее время российская истребительная авиация оснащена устаревшей наשלемной системой целеуказания типа «Сура» украинского производства и ее российским аналогом НСЦ-Т, выпускаемым ОКБ «Электроавтоматика». На серийно выпускаемых российских вертолетах подобные системы не устанавливались.

**Цель диссертации** заключается в разработке методов и алгоритмов повышения точности, расширения рабочего диапазона угловых координат, обеспечения стабильности и бесперебойности функционирования СП в составе авиационных НИУС.

**Основные задачи работы:**

- проведение сравнительного анализа существующих методов и алгоритмов определения положения подвижных объектов и выявление наиболее пригодных для достижения поставленной цели;

- разработка алгоритма автоматического выбора активного светодиодного кластера, обеспечивающего снижение погрешности оценки угловых координат оптико-электронной СП;

- разработка метода расширения диапазона рабочих углов оптико-электронной СП, основанного на адаптации системы к работе по данным от одной либо от двух камер;

- разработка метода комплексирования оптико-электронной и инерциальной СП с объединением их в гибридную СП;

- разработка методик оценки характеристик СП и проведение экспериментальных исследований.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач применялись математические методы проективной геометрии, численные методы оптимизации, численные методы определения ориентации твердого тела по вектору угловой скорости, методы имитационного моделирования и постановки натурного эксперимента.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в том, что в ней разработаны методы и алгоритмы, позволяющие в 1,4 раза снизить погрешность и в среднем на 14 % расширить азимутальный диапазон угловых координат оптико-электронной СП, а также обеспечить бесперебойное отслеживание гибридной СП угловых координат положения шлема в диапазоне  $\pm 180^\circ$  по азимуту и  $\pm 90^\circ$  по углу места со среднеквадратической погрешностью не более  $20'$  на ограниченном временном интервале работы инерциальной подсистемы.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1 Алгоритм автоматического выбора активного светодиодного кластера, основанный на использовании критерия максимума пикового отношения сигнал-шум на отметках реперов, обеспечивающий снижение погрешности оценки угловых координат оптико-электронной СП до 1,4 раза по сравнению с алгоритмом выбора активного кластера по критерию максимума площади его изображения.

2 Метод расширения диапазона рабочих углов оптико-электронной СП, основанный на адаптации системы к работе по данным от одной либо от двух камер в зависимости от наблюдения/не наблюдения одновременно обеими камерами хотя бы одного трехреперного кластера, позволяющий увеличить диапазон рабочих углов в азимутальной плоскости в среднем на 14 % по сравнению с СП, постоянно

работающей по данным от двух камер, при сохранении среднеквадратической погрешности определения угловых координат.

3 Метод комплексирования данных от оптико-электронной и инерциальной СП, основанный на использовании комплементарного фильтра Калмана, обеспечивающий непрерывную выдачу угловых координат при кратковременном отсутствии реперных излучателей в поле зрения камер и позволяющий расширить рабочий диапазон определения угловых координат по азимуту и углу места не менее чем на 50 % по сравнению с оптико-электронной СП, при среднеквадратической погрешности не более 20' на ограниченном временном интервале работы инерциальной СП без коррекции.

**Практическая значимость работы** состоит в том, что разработанные методы обеспечивают повышение точности, расширение диапазона рабочих углов, достижение стабильности и бесперебойности функционирования СП в составе опытного образца бортовой НИУС боевого вертолета.

**Реализация и внедрение.** Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» на основе результатов, полученных в Научно-конструкторском центре видеокomпьютерных технологий АО «Государственный Рязанский приборный завод» (АО «ГРПЗ») в рамках участия в выполнении НИР «Разработка унифицированной наשלемной информационно-управляющей системы для дистанционного управления вооружением и подвижными объектами военной техники различных родов войск» (шифр – «Шлем-2», заказчик – МО РФ), СЧ ОКР «Разработка наשלемной системы целеуказания и индикации» (шифр – «Визир», заказчик – АО «Камов»), ОКР «Разработка типового ряда интегрированных в защитный шлем летчика систем целеуказания и индикации для модернизируемых и перспективных авиационных комплексов фронтовой авиации и боевых вертолетов с использованием унифицированных модулей» (шифр – «ЛУЧ-1», заказчик – МО РФ), СЧ ОКР «Участие в подготовке и проведении ПИ и ГСИ изделия «296» в части НСЦИ-В» (шифр – «Авангард-НСЦИ», заказчик – АО «Московский вертолетный завод им. М.Л. Миля»).

Результаты диссертационной работы внедрены в АО «ГРПЗ» в опытных образцах изделия НСЦИ-В и в контрольно-проверочном стенде для настройки и испытаний изделия НСЦИ-В, в АО «МВЗ им. М.Л. Миля» в изделии «296», а также в учебном процессе кафедры «Электронные вычислительные машины» РГРТУ в дисциплинах «Специализированные ЭВМ», направление подготовки – 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» (программа бакалавриата) и «Системы технического зрения», направление подготовки – 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника» (программа магистратуры).

**Достоверность полученных результатов** подтверждена результатами математического моделирования, лабораторных исследований, стендовой отработки, а также положительными результатами предварительных и межведомственных испытаний опытных образцов изделия НСЦИ-В на соответствие требованиям технического задания.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались:

- на 1-й Всероссийской научно-практической конференции «Устройства измерения, сбора и обработки сигналов в информационно-управляющих комплексах (Ульяновск, 2011 г.);

- научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления – 2011» (Москва, 2011 г.);
- IX Всероссийской конференции «Новые технологии» (Москва, 2012 г.);
- научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления – 2015» (Москва, 2015 г.);
- X юбилейном международном форуме «Оптические системы и технологии» в рамках III тематической научно-технической конференции «Новые разработки оптико-электронных и лазерно-локационных систем и технологий для летательных аппаратов» (Москва, 2015 г.);
- 2-й Всероссийской конференции «Перспективы развития систем ориентирования, навигации и топопривязки наземных подвижных объектов «Навигация-2015» (Суздаль, 2015 г.);
- Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства» (Рязань, 2016 г.);
- II Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства» (Рязань, 2017 г.);
- 3-й Всероссийской научно-технической конференции «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами» (Москва, 2017 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 23 печатные работы, из них пять статей в научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, одна из них в издании, включенном в международную базу SCOPUS, семь статей в прочих изданиях, три тезиса докладов на конференциях, шесть патентов РФ, одна заявка на изобретение, одно учебное пособие для студентов вузов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка используемых источников и приложения. Текст работы содержит 143 страницы, 40 рисунков и 6 таблиц. Список используемых источников включает 111 наименований. В приложении приведены документы о внедрении и практическом использовании результатов диссертации.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** представлена роль НИУС на борту современных самолетов и вертолетов. Для решения задач целеуказания, прицеливания и пилотирования НИУС должна обеспечивать определение направления визирования летчика путем непрерывного отслеживания положения шлема в системе координат ЛА и выдачу координат положения в бортовой вычислитель. Положение шлема отслеживает СП, которая может строиться на различных физических принципах, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Объединение в одной СП нескольких подсистем, основанных на различных физических принципах, позволяет совместить преимущества этих подсистем и компенсировать их недостатки.

**В первой главе** представлены основные способы определения положения шлема, нашедшие практическое применение в НИУС, и проанализированы их сравнительные характеристики. В качестве прототипа рассмотрена оптико-электронная СП серийно выпускаемой украинским предприятием «Арсенал» наשלемной системы целеуказания (НСЦ) типа «Сура». СП содержит наשלемный реперный узел, состоящий из трех инфракрасных светодиодов с полусферической диаграммой направленности, и два сканирующих оптико-локационных узла, жестко закрепленных в кабине ЛА. В процессе эксплуатации данная СП обеспечивает

необходимую связь между системами координат нашлемного индикатора и прицельной системы ЛА при углах целеуказания в ограниченном диапазоне  $-60^\circ \dots +60^\circ$  по азимуту и  $-15^\circ \dots +60^\circ$  по углу места с точностью до 10 мрад. Недостатками НСЦ «Сура» являются относительно низкая точность, малые диапазоны рабочих углов, наличие габаритных оптико-локационных узлов в кабине, чувствительность к внешней засветке. В связи с тем, что каждый из двух оптико-локационных узлов определяет только часть данных, необходимых для вычисления координат реперных точек, повышаются требования к точности установки этих узлов в кабине и к стабильности диаграммы направленности излучения реперных светодиодов, а для обеспечения работоспособности НСЦ требуется проведение тщательной и трудоемкой юстировки. Современные требования к НИУС диктуют необходимость расширения рабочего диапазона углов, повышения стабильности и точности СП.

**Во второй главе** рассмотрены принципы определения пространственной ориентации подвижного объекта в оптико-электронных СП и предложены методы и алгоритмы повышения точности, расширения диапазона рабочих углов, достижения стабильности и бесперебойности функционирования таких СП.

С целью определения пространственных координат излучающих реперных светодиодов их объединяют в конструктивно связанные группы по  $n \geq 3$  элементов – так называемые кластеры. Для обеспечения минимальной среднеквадратической ошибки (СКО) оценивания координат предпочтительным является равноудаленное расположение реперов, обеспечивающее минимальный геометрический фактор. На практике распространение получили кластеры в форме треугольников ( $n = 3$ , оценка координат по информации от двух камер) или тетраэдров ( $n = 4$ , оценка координат по информации от одной или двух камер) произвольной формы.

Для увеличения рабочего диапазона углов применено несколько реперных кластеров, переключение между которыми производится по определенному критерию. Кластеры имеют приблизительно одинаковые размеры, состоят из светодиодов с широкой диаграммой направленности излучения (ДНИ) и имеют одинаковую рабочую длину волны излучения в диапазоне ближних инфракрасных либо ультрафиолетовых волн с целью минимизации влияния солнечной засветки.

Известен алгоритм выбора реперного кластера по критерию максимума площади его проекции на плоскость фотоприемной матрицы камеры. При использовании данного алгоритма предполагается, что реперы имеют равномерную ДНИ и достаточным условием для идентификации их проекций на плоскости изображения является наличие прямой видимости. Однако при этом не учитывается реальная форма ДНИ светодиодов. Малый размер либо малая яркость репера, даже при наличии прямой видимости, не позволяют идентифицировать сегмент изображения как проекцию этого репера.

Разработан алгоритм выбора рабочего реперного кластера, лишенный данного недостатка. При этом вводятся следующие положения и ограничения:

1) реперы представляют собой светодиодные излучатели с одинаковой интенсивностью свечения и формой ДНИ;

2) все кластеры представляют собой тетраэдры с основанием в виде правильного треугольника с длиной стороны  $L$  и высотой  $H < L$ ; взаимное расположение тетраэдров относительно одного из них, выбранного опорным (имеет порядковый номер 0), априори известно и задается соответственно матрицами

поворота  $\mathbf{R}_{j0}$  и векторами параллельного переноса  $\mathbf{t}_{i0}$ ,  $i = 1 \dots N_k - 1$ , где  $N_k$  – количество кластеров. Реперы основания имеют порядковые номера 1, 2, 3; репер вершины – номер 4. Координаты  $j$ -го репера  $i$ -го кластера в системе координат шлема пилота задаются вектором однородных координат  $\mathbf{M}_i^{(j)}$ ;

3) для всех реперов по результатам предварительных измерений известны направляющие косинусы, задающие их вектор нормали  $\mathbf{n}_i^{(j)}$  в системе координат опорного кластера с  $\mathbf{n}_0^{(0)}$ , где  $i$  – номер кластера,  $j$  – номер репера в  $i$ -м кластере;

4) для оценки пространственных координат реперов кластера применяется алгоритм Perspective-n-Point ( $PnP$ ), где  $n$  – количество реперов;

5) оценка пространственных координат реперов выполняется в системе координат камеры (СКК);

6) дисторсия объектива камеры полагается полностью скомпенсированной;

7) ошибки решения задачи  $P4P$  оцениваются только в статическом режиме.

При работе со светодиодными реперными излучателями необходимо учитывать, что их ДНИ является неоднородной и имеет максимум в направлении нормали к плоскости светодиода. Для большинства светодиодов ДНИ аппроксимируется параметрическим семейством кривых вида:

$$I(\theta_n) = I_0 \cos^g \theta_n, \quad (1)$$

где  $\theta_n$  – угол между нормалью к плоскости светодиода и выбранным направлением,  $I_0$  – интенсивность светового потока в направлении нормали ( $\theta_n = 0$ ).

Анализ ДНИ отечественных и зарубежных светодиодов ближнего инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов с шириной диаграммы излучения  $\Delta\theta_{0,5} = 120^\circ \dots 140^\circ$  показывает, что они хорошо аппроксимируются параметрическими кривыми с  $g = 2 \dots 3$  (при  $g = 2$  ДНИ описывается кривой Ламберта).

Яркость отметки от репера  $Y$  на матрице камеры также зависит от направления и расстояния от репера до камеры: для неподвижной камеры  $Y(\theta_n) = I(\theta_n) \cos \theta_n / d^2$ , для подвижной камеры  $Y(\theta_n) = I(\theta_n) \cos^3 \theta_n / d^2$ , где  $d$  – расстояние от кристалла светодиода до светочувствительной матрицы камеры.

Для оценки координат отметки от реперного излучателя с субпиксельной точностью выполняется вычисление средневзвешенных координат  $(u^{(j)}, v^{(j)})$  центров свечения.

При наличии собственного шума камеры с СКО  $\sigma_{ш}$  зависимость погрешности оценки пиксельных координат центра отметки репера от пикового отношения сигнал/шум (ПОСШ) носит нелинейный характер. Методом имитационного моделирования с фиксированным порогом бинаризации  $Y_{пор} = 64$  при совпадающих векторах нормалей матрицы камеры и плоскости светодиода получены усредненные (по  $N = 10^3$  статистически независимых реализаций) зависимости СКО оценок координат центра свечения реперов  $\sigma_{uv} = [0,5(\sigma_u^2 + \sigma_v^2)]^{0,5}$  от ПОСШ  $q = Y(0)/\sigma_{ш}$ . Из этих зависимостей следует, что при снижении ПОСШ  $q$  СКО оценок пиксельных координат увеличивается до 0,5...0,6 пикселя, что при решении задачи  $PnP$  приводит к увеличению погрешности оценивания пространственных и угловых координат кластеров.

Разработанный алгоритм отличается тем, что выбор рабочего реперного кластера осуществляется по критерию максимума яркости отметок его реперов на изображении. С учетом введенных при постановке задачи ограничений критерий автоматического выбора активного светодиодного кластера представляется в виде:



$$\max_i \left[ \frac{1}{\|\mathbf{r}_i\|^2} \left( \frac{\mathbf{n}_{3i}^T \mathbf{r}_i}{\|\mathbf{n}_{3i}\| \|\mathbf{r}_i\|} \right)^g \right], \quad i = 0, 1, N_k - 1, \quad (2)$$

где  $\mathbf{n}_{3i}$  – вектор нормали реперов  $i$ -го кластера в его текущем положении,

$$\mathbf{n}_{3i} = \mathbf{R}_3 \mathbf{n}_i, \quad (3)$$

$\mathbf{r}_i$  – радиус-вектор, проведенный из начала СКК в центр масс  $i$ -го кластера из  $n$  реперов,  $\mathbf{R}_3$  – матрица поворота, описывающая угловое перемещение кластера (эволюцию) на момент наблюдения относительно его исходного положения,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}_i \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \mathbf{T}_{0c} \mathbf{T}_3 \mathbf{T}_{i0} \mathbf{M}_i^{(j)} - [0, 0, 0, 1]^T, \quad (4)$$

$\mathbf{T}_{0c}$  – матрица трансформации для перехода из системы координат шлема в систему координат камеры,  $\mathbf{T}_3$  – матрица трансформации, определяющая угловое и пространственное перемещение (эволюцию) шлема,  $\mathbf{T}_{i0}$  – матрицы трансформации, определяющие угловое и пространственное положение кластеров в момент включения СП, а выражение в круглых скобках в (2) в соответствии с теоремой косинусов представляет собой косинус угла между нормалью к плоскости репера и направлением на камеру, т.е.  $\cos\theta_n$ .

Разработанный алгоритм заключается в последовательном применении критерия (2) к каждому реперному кластеру и выборе того кластера, который обеспечивает большее количество световой энергии на поверхности фотоприемной матрицы камеры и соответственно большее отношение сигнал/шум.

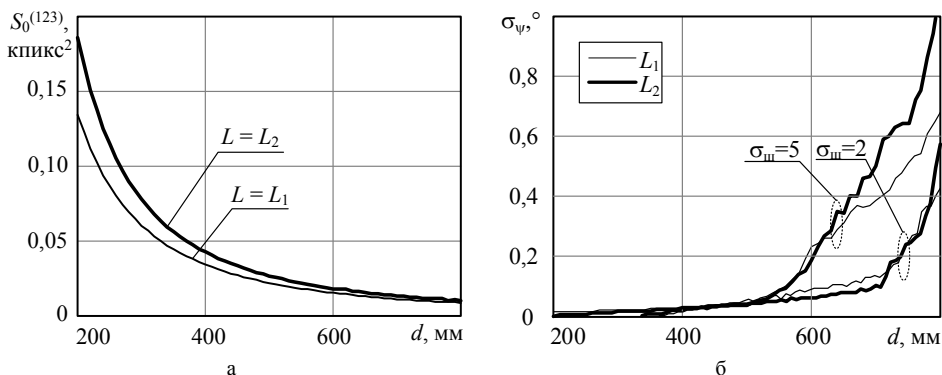
Для исследования погрешности оценивания угловых и пространственных координат составлена математическая модель однокамерной СП, параметрами которой выступают геометрические размеры кластеров (точки с однородными пространственными координатами  $\mathbf{M}_i^{(j)}$ ), матрица внутренних параметров камеры

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1200 & 0 & 960 \\ 0 & 1200 & 540 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \text{СКО шума матрицы камеры } \sigma_{ш}, \quad \text{ДНИ реперных излучателей}$$

в соответствии с формулой (1), а также матрицы трансформации.

Результаты моделирования, приведенные на рисунке 1, получены путем усреднения результатов  $N = 10^3$  статистически независимых экспериментов для кластеров с длиной ребра основания  $L_1 = 100$  мм и  $L_2 = 120$  мм и  $H_{1(2)} = 0,25L_{1(2)}$  при решении задачи P4P.

На рисунке 1,а показаны зависимости площади изображения основания опорного реперного кластера  $S_0^{(123)}$  от удаления  $d$  (в мм) его центра масс относительно начала СКК: нижняя кривая соответствует кластеру с  $L = L_1$ , координатами центра масс кластера в СКК  $\mathbf{r}_0 = [100, 50, d]^T$  и векторами нормалей реперов, заданными углами  $\psi = \theta = \varphi = \pi/10$ ; верхняя кривая – кластеру с  $L = L_2$ , аналогичными координатами центра масс и векторами нормалей реперов, заданными углами  $\psi = \theta = \varphi = \pi/5$ . В модели интенсивность  $I_0$  светового потока реперов в (1) была установлена такой, чтобы при  $d = 400$  мм,  $\sigma_{ш} = 0$  и  $\psi = \theta = \varphi = 0$  обеспечивалась яркость отметки центрального репера кластера  $Y(0) = 255$ .



**Рисунок 1 – Результаты математического моделирования однокамерной СП:**  
 а – зависимость площади основания изображения кластеров от их удаленности,  
 б – зависимость СКО оценки углового положения от удаленности кластеров

Из анализа зависимостей на рисунке 1,а следует, что при данном взаимном расположении кластеров для всех дальностей  $d$  по критерию максимума площади изображения будет выбран кластер с  $L = L_2$ .

На рисунке 1,б приведены две пары зависимостей СКО оценки угловых координат по азимуту (при СКО собственного шума матрицы  $\sigma_{ш} = 2$  и 5 пикселей) для рассмотренных выше кластеров при аппроксимации ДНИ реперов кривой Ламберта ( $g = 2$ ).

Как следует из полученных результатов моделирования СП, с учетом формы ДНИ светодиодных реперов, возможна ситуация, когда ПОСШ отметок реперов кластера с большей площадью изображения оказывается в 1,1...1,3 раза меньше, чем ПОСШ отметок реперов кластера с меньшей площадью изображения. Для рассматриваемой модели такое снижение ПОСШ приводит к росту СКО оценки азимута до 1,4 раза (при  $q < 15$ ).

Разработанный алгоритм выбора активного светодиодного кластера по критерию максимума ПОСШ на отметках реперов обеспечивает снижение погрешности оценки угловых координат до 1,4 раза по сравнению с известным алгоритмом выбора активного кластера по критерию максимума площади его изображения.

С целью расширения диапазона рабочих углов разработан метод адаптации оптико-электронной СП к работе по данным от одной либо от двух камер. Метод заключается в реализации трех режимов работы СП:

1) двухкамерный режим работы – определение пространственных координат светоизлучающих реперов с использованием алгоритма работы по данным от предварительно откалиброванной пары камер и кластерам из  $n = 3$  репера;

2) однокамерный режим работы – в случае, если в поле зрения каждой из камер не наблюдается одновременно  $n = 3$  светоизлучающих репера, выполняется переход к вычислению координат с использованием алгоритма *P4P* по данным от одной камеры и кластерам, состоящим из  $n = 4$  репера. Условием выхода из однокамерного режима является появление в поле зрения каждой из двух камер  $n = 4$

светоизлучающих репера. В этом случае производится переход в двухкамерный режим работы;

3) ждущий режим работы – в случае, если в поле зрения камер не наблюдается достаточного для определения пространственного положения количества светоизлучающих реперов ( $n = 3$  для двух камер либо  $n = 4$  для одной камеры), выполняется процедура последовательного зажигания кластеров из  $n = 4$  репера до тех пор, пока в поле зрения хотя бы одной камеры не появится  $n = 4$  светоизлучающих репера. При обнаружении  $n = 4$  светоизлучающих репера выполняется процедура идентификации их номеров в кластере. Если реперы наблюдаются только одной из камер, то осуществляется переход в однокамерный режим работы, если двумя – то переход в двухкамерный режим.

Идентификация номеров реперных излучателей в кластере осуществляется путем нахождения соответствия между пространственными координатами реперов  $\mathbf{M}_i$  и пиксельными координатами  $\mathbf{m}_k$  центров их свечения на изображении с камеры. Это соответствие в однокамерном и двухкамерном режимах работы в текущий момент времени  $j$  определяется по критерию минимума ошибки репроекции:

$$i = k, k: \left\| \mathbf{m}_k - \mathbf{P}\mathbf{T}^{(j-1)}\mathbf{M}_{0i}^{(j-1)} \right\| \rightarrow \min_k, i = \overline{1, 3(4)}, k = \overline{1, 3(4)}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{T}^{(j-1)}$  – матрица трансформации, связывающая исходные координаты реперов  $\mathbf{M}_{0i}$  и их координаты в момент времени  $(j-1)$ ,  $\mathbf{P}$  – матрица проекции.

В ждущем режиме работы при пропадании реперов из поля зрения камер и последующем их появлении нельзя однозначно установить соответствие между проекциями реперов и их номерами в кластере, так как текущие координаты реперов априорно неизвестны, а задача  $P4P$ , как правило, не имеет единственного решения (обычно их два). Для исключения выбора ошибочного решения при обнаружении камерой  $n = 4$  репера выполняется процедура идентификации их номеров в кластере. Для этого производится поочередное зажигание в кластере одного из реперов с номером  $i$ ,  $i = \overline{1, 4}$ , и сохранение его пиксельных координат  $\mathbf{m}_{ожi}$  в памяти вычислителя. По окончании этой процедуры зажигаются все реперы кластера и определение пиксельных координат репера с номером  $i$  производится по правилу:

$$\mathbf{m}_i = \mathbf{m}_n, n: \left\| \mathbf{m}_{ожi} - \mathbf{m}_n \right\| \rightarrow \min_n, i = \overline{1, 4}, n = \overline{1, 4}. \quad (6)$$

Идентификация номеров реперов считается успешной, если по окончании вычислений (6) пиксельные координаты всех реперов с номерами  $i = \overline{1, 4}$  являются различными, т.е. справедливы неравенства

$$\|\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j\| \neq 0, i, j = \overline{1, 4}, i \neq j. \quad (7)$$

Если условие (7) не выполняется, например при высокой угловой скорости перемещения реперов, то процедуры ждущего режима повторяются.

Переключение между реперными кластерами в однокамерном и двухкамерном режимах работы СП выполняется по критерию (2).

Разработанный метод адаптации СП к работе по данным от одной либо двух камер увеличивает диапазон рабочих углов в азимутальной плоскости в среднем на 14 % по сравнению с СП, постоянно работающей только по данным от двух камер.

В третьей главе рассмотрены проблемы построения инерциальных СП и разработан метод комплексирования координатной информации от оптико-электронной и инерциальной СП с объединением их в одну гибридную систему.

Разработка гибридной СП позволяет объединить достоинства оптико-электронной (высокая точность, отсутствие дрейфа, нечувствительность к изменению температуры внешней среды) и инерциальной (высокая скорость обновления координатной информации, широкий диапазон угловых и линейных перемещений, отсутствие влияния засветки) СП. Комплексирование оптико-электронной и инерциальной СП расширяет рабочий диапазон перемещений шлема за пределы полей зрения камер с переходом на инерциальные датчики.

Классическим способом комплексирования данных от различных источников является применение фильтра Калмана, описываемого в общем случае в виде двух последовательно выполняемых операций экстраполяции и коррекции по результатам измерений:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{k-1}, \quad \mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}, \quad (8)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}, \quad \mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^-, \quad \hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-), \quad (9)$$

где  $\mathbf{x}$  и  $\mathbf{z}$  – векторы состояния и наблюдений соответственно,  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{K}$  – соответственно матрицы динамики системы, применения управляющего воздействия  $\mathbf{u}$  и коэффициентов усиления фильтра,  $\mathbf{P}$  – апостериорная матрица ковариаций ошибок предсказания,  $\mathbf{H}$  – матрица взаимосвязи между векторами  $\mathbf{x}$  и  $\mathbf{z}$ ,  $\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{Q}$  и  $\mathbf{R}$  – матрицы ковариации шума процесса и шума измерений,  $\mathbf{I}$  – единичная матрица, а символом « $\bar{\phantom{x}}$ » обозначено априорное состояние.

При объединении навигационных данных о значениях углов Эйлера взаимосвязь векторов состояний и наблюдений является нелинейной:

$$\mathbf{z} = h(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \text{atan2}[2(x_2x_3 + x_0x_1), x_0^2 - x_1^2 - x_2^2 + x_3^2] \\ \arcsin[-2(x_1x_2 + x_0x_3)] \\ \text{atan2}[2(x_1x_2 + x_0x_3), x_0^2 + x_1^2 - x_2^2 + x_3^2] \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где вектор состояния  $\mathbf{x}$  является текущим кватернионом поворота. По этой причине использовать линейный фильтр Калмана (8), (9) для оценки вектора  $\mathbf{x}_k$  затруднительно. Возможными путями решения данной проблемы являются либо применение расширенного фильтра Калмана с соответствующим вычислением частных производных функции  $h(\cdot)$  в (10), либо использование различных численных аппроксимаций апостериорной плотности распределения вероятностей с применением ансамблевого фильтра Калмана.

Разработанный метод комплексирования угловых координат от оптико-электронной и инерциальной СП основан на объединении координатной информации от разнородных датчиков с применением упрощенного варианта реализации фильтра Калмана – альфа-бета фильтра, уравнения которого имеют вид:

$$\mathbf{x}_k = F_1(p)\mathbf{z}_k + F_2(p)\dot{\mathbf{x}}_k / p, \quad \mathbf{z}_k = H(p)\mathbf{x}_k + \mathbf{n}_k, \quad (11)$$

где  $H(p)$  и  $F_1(p)$  – передаточные функции для фильтров нижних, а  $F_2(p)$  – верхних частот,  $\mathbf{n}_k$  – гауссовский шум с нулевым средним.

При  $F_1(p) + F_2(p) = 1$  фильтр (11) является комплементарным фильтром Калмана (КФК) с весовым коэффициентом  $\delta$ :

$$\mathbf{x}_k = \delta \mathbf{z}_k + (1 - \delta) \dot{\mathbf{x}}_k / p. \quad (12)$$

КФК позволяет осуществлять постоянную коррекцию угловых координат положения шлема, вычисляемых инерциальной СП, по результатам работы оптико-электронной СП, чтобы в случае ждущего режима работы последней (пропадание оптической связи или солнечная засветка) временно выдавать координаты положения шлема только по данным от инерциальной СП.

Метод отличается введением логического признака условий работы оптико-электронной СП  $\gamma$ ,

$$\gamma = \begin{cases} 1, & \text{штатные условия работы оптико-электронной СП,} \\ 0, & \text{ждущий режим работы оптико-электронной СП.} \end{cases}$$

В этом случае работа гибридной СП описывается выражениями:

$$[\varphi_i, \psi_i, \theta_i]^T = \gamma \delta [\varphi_{i\_опт}, \theta_{i\_опт}, \psi_{i\_опт}]^T + (1 - \gamma \delta) [\varphi_{i\_мэмс}, \theta_{i\_мэмс}, \psi_{i\_мэмс}]^T, \quad (13)$$

$$[\varphi_{i\_лв}, \psi_{i\_лв}, \theta_{i\_лв}]^T = \begin{cases} [\varphi_i, \theta_i, \psi_i]^T, & \gamma = 1, \\ [\varphi_{i\_мэмс}, \theta_{i\_мэмс}, \psi_{i\_мэмс}]^T, & \gamma = 0, \end{cases} \quad (14)$$

$$\mathbf{q}_{i\_мэмс} = (\mathbf{q}_{i-1\_лв} + \mathbf{q}_{i\_рот}) / \|\mathbf{q}_{i-1\_лв} + \mathbf{q}_{i\_рот}\|, \quad (15)$$

где  $[\varphi_{i\_лв}, \theta_{i\_лв}, \psi_{i\_лв}]^T$  – вектор-столбец текущих угловых координат линии визирования (ЛВ),  $[\varphi_{i\_опт}, \theta_{i\_опт}, \psi_{i\_опт}]^T$  и  $[\varphi_{i\_мэмс}, \theta_{i\_мэмс}, \psi_{i\_мэмс}]^T$  – векторы-столбцы текущих угловых координат, вычисленных оптико-электронной СП и инерциальной СП с микроэлектромеханическим сенсором (МЭМС) соответственно,  $\mathbf{q}_{i\_рот}$  – кватернион поворота по информации от инерциальной СП.

Величина  $(1-\delta)/\delta$ , зависящая от параметра  $\delta$  в (13), имеет физический смысл нормированного времени релаксации и показывает, что при условии появления реперных излучателей в поле зрения камеры переходный процесс достигнет установившегося значения (угловых координат оптико-электронной СП) не более чем через  $T_i(1-\delta)/\delta$  секунд. Комплексирование с параметром  $0,05 < \delta < 0,1$  позволяет как снизить уровень шумов определения угловых координат оптико-электронной СП, так и компенсировать дрейф сигналов угловой скорости инерциальной СП.

Разработанная структурная схема, реализующая комплексирование согласно (13)-(15), приведена на рисунке 2, где приняты следующие обозначения: ФП<sub>А</sub> – функциональный преобразователь сигналов МЭМС акселерометра, выполняющий операцию оценивания крена  $\psi_a$  и тангажа  $\theta_a$ , ФП<sub>Г</sub> – функциональный преобразователь сигналов МЭМС гироскопа  $\mathbf{w} = [0, w_x, w_y, w_z]^T$  для оценивания вектора угловых скоростей в системе координат шлема:

$$\mathbf{w}^c = \mathbf{q} \bullet \mathbf{w} \bullet \mathbf{q}^c,$$

где  $\mathbf{q}^c$  – сопряженный кватернион, определяющий текущее угловое положение, КФК<sub>МЭМС</sub> и КФК<sub>опт</sub> – КФК, реализующие операции объединения данных от МЭМС акселерометра и гироскопа согласно (12) и операции объединения данных от инерциальной и оптико-электронной СП (ОЭСП) согласно (13)-(15) соответственно. Блок ФП<sub>Г</sub> также выполняет операции оценивания постоянных смещений (дрейфа) сигналов МЭМС гироскопа для их компенсации. Для компенсации угловых перемещений ЛА в блок ФП<sub>Г</sub> поступают данные о текущих ускорениях  $[a_{x\_ЛА}, a_{y\_ЛА}, a_{z\_ЛА}]^T$  и угловых скоростях  $[w_{x\_ЛА}, w_{y\_ЛА}, w_{z\_ЛА}]^T$  от бортовой инерциальной навигационной системы (БИНС) ЛА.

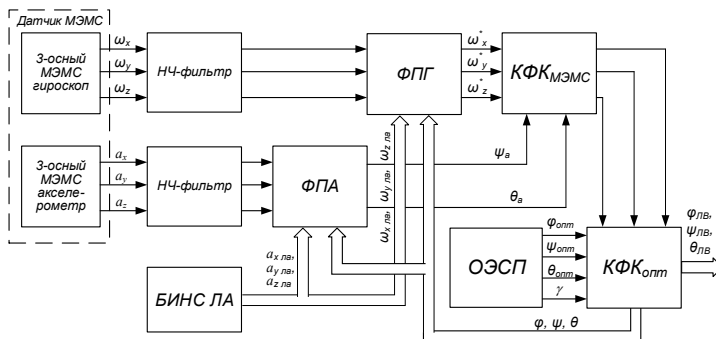


Рисунок 2 – Структурная схема разработанной гибридной СП

Разработанный метод комплексования оптико-электронной и инерциальной СП на основе КФК с приоритетом оптико-электронной подсистемы обеспечивает непрерывную выдачу угловых координат при потере оптической связи реперных излучателей с камерами и расширяет рабочий диапазон определения угловых координат по азимуту и углу места не менее чем на 50 % по сравнению с оптико-электронной СП при среднеквадратической погрешности не более 20' на ограниченном временном интервале работы инерциальной СП без коррекции.

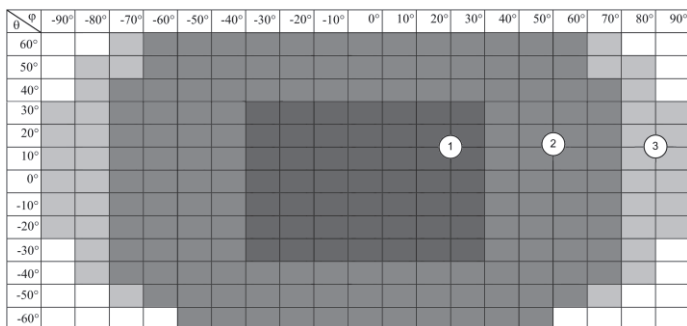
В четвертой главе изложены методики и результаты экспериментальной отработки оптико-электронной СП при решении задачи *P4P* с применением алгоритма минимизации Левенберга – Марквардта, результаты экспериментальных исследований инерциальной СП, результаты экспериментальных исследований метода расширения диапазона рабочих углов оптико-электронной СП при работе по информации от одной и от двух камер и метода комплексования угловых координат от оптико-электронной и инерциальной СП, реализованных в опытном образце изделия НСЦИ-В (рисунок 3).



Рисунок 3 – Внешний вид изделия НСЦИ-В

В процессе экспериментальных исследований нашлемный модуль НСЦИ-В устанавливался на моторизованной поворотной платформе и перемещался в азимутальной и угломестной плоскостях в диапазонах  $\pm 120^\circ$  и  $\pm 60^\circ$  соответственно. Точность оценивания координат СП НСЦИ-В исследовалась с помощью координатно-измерительной машины (КИМ) CimCore Infinite CA-7525 с погрешностью измерения линейных координат менее 50 мкм. Трехмерные координаты, измеренные КИМ, переводились в угловые координаты азимута  $\phi$  и угла места  $\theta$  относительно исходного положения и сравнивались со значениями на выходе СП.

На рисунке 4 показаны результаты исследования работы оптико-электронной СП НСЦИ-В с использованием разработанного метода расширения диапазона рабочих углов при работе по информации от одной и от двух камер.

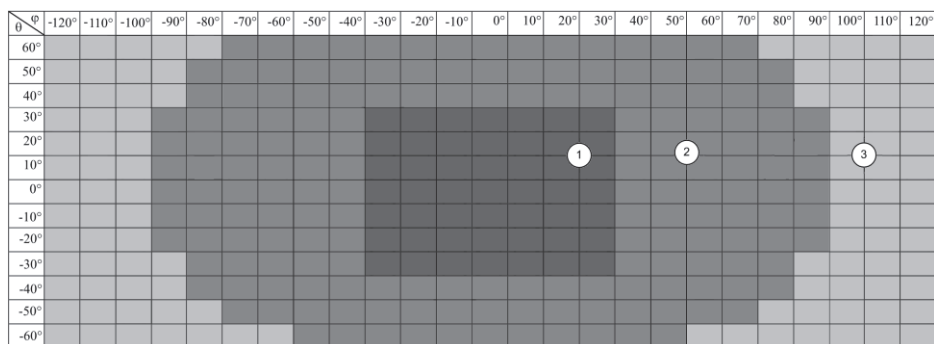


**Рисунок 4 – Рабочий диапазон углов оптико-электронной СП изделия НСЦИ-В**

На рисунке 4 темно-серым цветом (область 1) показана область работы оптико-электронной СП, в которой среднеквадратическая погрешность оценивания угловых координат не превышает  $15'$ ; серым цветом (область 2) – область работы по информации от двух камер при наблюдении кластеров из  $n=3$  реперов с погрешностью не более  $20'$ ; светло-серым цветом (область 3) – область работы по информации от одной камеры с аналогичной погрешностью.

Как следует из полученных результатов, применение данного метода позволяет расширить рабочий диапазон углов оптико-электронной СП по азимуту в среднем на 14 % при сохранении среднеквадратической погрешности оценивания угловых координат линии визирования.

На рисунке 5 представлены результаты экспериментального исследования комплексов оптико-электронной и инерциальной подсистем в гибридной СП изделия НСЦИ-В.



**Рисунок 5 – Рабочий диапазон углов гибридной СП изделия НСЦИ-В**

Темно-серым цветом показана область работы оптико-электронной СП, в которой среднеквадратическая погрешность оценивания угловых координат не

превышает 15' (область 1); серым цветом – область работы оптико-электронной СП со среднеквадратической погрешностью не более 20' (область 2); светло-серым – область работы инерциальной СП с погрешностью не более 20' на временном интервале до десяти секунд (область 3). Область 3 ограничена в данном случае диапазоном угловых перемещений моторизованной поворотной платформы.

Полученные результаты экспериментальных исследований подтверждают эффективность разработанных в диссертационной работе методов и алгоритмов.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

В диссертационной работе выполнена разработка методов и алгоритма повышения точности, расширения рабочего диапазона угловых координат, обеспечения стабильности и бесперебойности функционирования СП, в том числе:

1 Разработан алгоритм автоматического выбора активного светодиодного кластера, основанный на использовании критерия максимума пикового отношения сигнал/шум на отметках реперов, обеспечивающий снижение погрешности оценки угловых координат оптико-электронной СП до 1,4 раза по сравнению с алгоритмом выбора активного кластера по критерию максимума площади его изображения.

2 Разработан метод расширения диапазона рабочих углов оптико-электронной СП, основанный на адаптации системы к работе по данным от одной либо от двух камер в зависимости от наблюдения/не наблюдения одновременно обеими камерами хотя бы одного трехреперного кластера, позволяющий увеличить диапазон рабочих углов в азимутальной плоскости в среднем на 14 % по сравнению с СП, постоянно работающей по данным только от двух камер, при сохранении среднеквадратической погрешности определения угловых координат.

3 Разработан метод комплексирования данных от оптико-электронной и инерциальной СП, основанный на использовании комплементарного фильтра Калмана, обеспечивающий непрерывную выдачу угловых координат при кратковременном отсутствии реперных излучателей в поле зрения камер и позволяющий расширить диапазон определения угловых координат по азимуту и углу места не менее чем на 50 % по сравнению с оптико-электронной СП, при среднеквадратической погрешности не более 20' на ограниченном временном интервале работы инерциальной СП без коррекции.

4 Разработаны методики экспериментальных исследований для оценки эффективности предложенных методов и алгоритмов.

5 Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие эффективность разработанных методов и алгоритма.

Разработанные методы и алгоритм внедрены в АО «Государственный Рязанский приборный завод» в опытных образцах изделия НСЦИ-В ВИАМ.461334.047, прошедших предварительные и межведомственные испытания, в контрольно-проверочном стенде для настройки и испытаний изделия НСЦИ-В, в АО «МВЗ им. М.Л. Милая» в опытном образце изделия «296», а также в учебном процессе кафедры ЭВМ РГРТУ.

### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### **Работы, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:**

1 Костяшкин, Л.Н. Проблемные аспекты разработки наשלемых систем целеуказания и индикации для вертолетов / О.В. Павлов, Д.В. Трофимов,



Л.Н. Костяшкин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 3. – С. 57-63.

2 Белокуров, В.А. Использование трехосных MEMS гироскопов и акселерометров для задач определения пространственной ориентации подвижных объектов // В.А. Белокуров, В.Н. Горкин, В.Г. Костиков, В.И. Кошелев, О.В. Павлов, И.С. Холопов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2012. – № 41. – С. 26-31.

3 Кудинов, И.А. Реализация алгоритма определения пространственных координат и угловой ориентации объекта по реперным точкам, использующего информацию от одной камеры / И.А. Кудинов, О.В. Павлов, И.С. Холопов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 3. – С. 413-419. (SCOPUS).

4 Павлов, О.В. Сравнительный анализ двух алгоритмов выбора реперного светодиодного кластера в задаче навигации по оптическим меткам / О.В. Павлов, И.С. Холопов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2017. – № 61. – С. 13-18.

5 Павлов, О.В. Определение пространственного положения шлема в наשלемной информационно-управляющей системе / О.В. Павлов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – Вып. 9. – С. 126-136.

#### **Работы, опубликованные в других изданиях:**

6 Костяшкин, Л.Н. Российская НСЦИ для вертолетов / Л.Н. Костяшкин, О.В. Павлов, Д.В. Трофимов., В.П. Иванов, В.А. Балоев, И.Г. Денисов // Аэрокосмическое обозрение. – 2010. – № 4. – С. 16-19.

7 Костяшкин, Л.Н. Проблемы и перспективы разработки авиационных НСЦИ / Л.Н. Костяшкин, О.В. Павлов, Д.В. Трофимов // Тезисы докладов 1-й Всероссийской научно-практической конференции. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – С. 28-30.

8 Костяшкин, Л.Н. Нашлемная система видения для летательных аппаратов / Л.Н. Костяшкин, О.В. Павлов, Д.В. Трофимов // Научно-техническая конференция «Техническое зрение в системах управления-2011»: тезисы докладов. – М.: ИКИ РАН, 2011. – С. 18-19.

9 Костяшкин, Л.Н. Повышение надежности нашлемных систем целеуказания и индикации при комплексировании углов ориентации от оптико-электронной и инерциальной систем позиционирования / Л.Н. Костяшкин, О.В. Павлов, Д.В. Трофимов, И.С. Холопов // Новые технологии: материалы IX Всероссийской конференции. Т. 1. – М.: РАН, 2012. – С. 127-134.

10 Никифоров, М.Б. Нашлемная информационно-управляющая система для подвижных наземных объектов / М.Б. Никифоров, О.В. Павлов // Оборонная техника: научно-технический сборник. № 11-12. – М.: НТЦ «Информтехника» - филиал ФГУП «НИИСУ», 2015. – С. 170-174.

11 Кудинов, И. А. Использование численного алгоритма оптимизации в задаче определения координат подвижного объекта по четырём реперным точкам и информации от одной камеры / И.А. Кудинов, О.В. Павлов, И.С. Холопов // Техническое зрение. – 2015. – Вып. 1(8). – С. 32-39.

12 Костяшкин, Л.Н. Нашлемная система целеуказания и индикации / Л.Н. Костяшкин, О.В. Павлов // X юбилейный международный форум «Оптические

системы и технологии»: III тематическая научно-техническая конференция «Новые разработки оптико-электронных и лазерно-локационных систем и технологий для летательных аппаратов»: тезисы докладов. – М.: ВДНХ, 2015. – С. 74-75.

13 Павлов, О.В. Особенности разработки наשלемной системы целеуказания и индикации / Павлов О.В. // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Bookjet), 2016. – С. 96-107.

14 Павлов, О.В. Нашлемная информационно-управляющая система как часть информационно-управляющего поля кабины летательного аппарата / Павлов О.В. // Материалы II Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Bookjet), 2017. – С. 150-163.

15 Павлов, О.В. Однокамерный алгоритм определения пространственного положения шлема в нашлемной информационно-управляющей системе / О.В. Павлов // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвузовский сборник научных трудов / под ред. А.Н. Пылькина. – Рязань: РГРТУ, 2018. – С. 11-17.

#### **Патенты:**

16 Способ улучшения цифровых изображений / Богданов А.П., Костяшкин Л.Н., Матвеева Е.И., Морозов А.В., Павлов О.В., Романов Ю.Н., Рязанов А.В. // Патент РФ на изобретение № 2452025, МПК G06T 5/00, 2012.

17 Тест-объект для калибровки видеодатчиков многоспектральной системы технического зрения / Кудинов И.А., Павлов О.В., Холопов И.С. // Патент РФ на изобретение № 2670776, МПК G06T 7/80, 2018.

18 Тестовый шаблон для калибровки видеодатчиков многоспектральной системы технического зрения / Кудинов И.А., Павлов О.В., Холопов И.С. // Патент РФ на изобретение № 2672466, МПК G06T 7/80, 2018.

19 Датчик позиционирования оптический / Артемьева Т.В., Кабанов В.Д., Павлов О.В. // Патент РФ на промышленный образец № 100146, МКПО 16-01, 16-06, 2016.

20 Блок электронный / Кабанов В.Д., Зайцев А.А., Павлов О.В., Костиков В.Г., Морозов А.В. // Патент РФ на промышленный образец № 88232 МКПО 14-03, 2014.

21 Модуль видеокамеры / Павлов О.В., Кабанов В.Д., Костиков В.Г., Зайцев А.А., Артемьева Т.В. // Патент РФ на полезную модель № 176122, МПК G03B 17/02, 2018.

22 Способ оценивания по реперным точкам угловых и пространственных координат объекта в оптико-электронной системе позиционирования / Кудинов И.А., Павлов О.В., Холопов И.С., Храмов М.Ю. // Заявка на изобретение № 2019116629, МПК: G01S 5/16, F41G 3/22 от 29.05.2019.

#### **Учебное пособие:**

23 Никифоров, М.Б. Нашлемные системы целеуказания и индикации: учебное пособие / М.Б. Никифоров, О.В. Павлов, И.С. Холопов // Рязанский государственный радиотехнический университет. Рязань: ИП Коняхин А.В. (Bookjet), 2018. – 36 с.

**ПАВЛОВ Олег Вячеславович**

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В АВИАЦИОННЫХ  
НАШЛЕМНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 12.07.2019. Формат бумаги 60x84 1/16.  
Бумага . Печать трафаретная. Усл. Печ. л. 1,0.  
Тираж 100 экз. Заказ 4595

Отпечатано в типографии ИП Коняхин А.В. (Book Jet)

390005, г. Рязань,  
ул. Пушкина, д. 18  
сайт: <http://bookjet.ru>  
почта: [info@bookjet.ru](mailto:info@bookjet.ru)  
тел.: +7 (4912) 466-151