

На правах рукописи



Скрябин Юрий Михайлович

**Информационно-измерительная система
электростатической локации БПЛА и её
алгоритмическое обеспечение**

Специальность 2.2.11. —
«Информационно-измерительные и управляющие системы»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань — 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "МИРЭА Российский технологический университет".

Научный руководитель: доцент, доктор технических наук
Потехин Дмитрий Станиславович

Официальные оппоненты: **Жиган Игорь Платонович**,
доктор технических наук, профессор,
АО "НИИ "Полюс" имени Ф.М. Стельмаха",
начальник ОКБ "Гранит"

Умнов Алексей Львович,
кандидат физико-математических наук,
ННГУ им. Н.И. Лобачевского,
доцент кафедры электродинамики радиофизического факультета

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

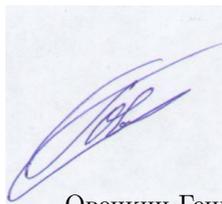
Защита состоится 25 июня 2025 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д24.2.375.03 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» и на сайте www.rsreu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, ученому секретарю диссертационного совета Д24.2.375.03.

Автореферат разослан 11 апреля 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д24.2.375.03,
д-р. техн. наук



Овечкин Геннадий Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время ведутся работы по развитию систем разведки беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Стандартные радиолокационные средства разведки, которые с высокой степенью вероятности способны обнаружить, идентифицировать и определить текущее местоположение крупных летательных аппаратов, оказываются неэффективны при обнаружении БПЛА. Это связано с меньшей эффективной площадью рассеяния (ЭПР) радиоволн вследствие меньших размеров и использованием других материалов. Кроме того, БПЛА могут передвигаться на малых и сверхмалых высотах, на которых наблюдается высокая доля паразитного переотраженного радиоизлучения от подстилающей поверхности (ПП).

Выделяют два способа решения данной проблемы. Первый способ заключается в усовершенствовании самих систем радиолокации, например при помощи сверхкороткоимпульсного радиоизлучения. Второй способ заключается в объединении радиолокационных систем со средствами разведки на иной физической природе для использования преимуществ их совокупности. Таким образом, каждое из средств разведки следует определить как подсистему общей информационно-измерительной системы локации, решающую все или часть задач по детектированию БПЛА: обнаружение, идентификацию, сопровождение цели. Использование нескольких средств разведки позволяет использовать сильные стороны каждой из подсистем, закрыв слабые места каждой из них в отдельности.

По физической природе средства разведки делят на следующие виды: радиолокационные, радиотехнические, оптико-электронные, акустические и электростатические. Каждая из данных систем обладает своими возможностями по обнаружению, идентификации, сопровождению целей при действии различных факторов: высоты, погоды, времени суток и прочих. Объединение данных средств в единый комплекс способствует возможности мониторинга воздушного пространства на предмет малых движущихся объектов в атмосфере в широком диапазоне условий.

Акустические и электростатические средства обнаружения схожи по своим возможностям и принципу. Они состоят из измерительных приборов, расположенных вдоль периметра охраняемой территории. Обработка совокупности измерений с данных приборов согласно определенному алгоритму позволяет получить информацию о текущем местоположении цели.

Преимуществом акустических и электростатических локационных систем является пассивность работы их датчиков и эффективность в обнаружении низколетящих целей, обнаружение которых затруднительно для радиолокационных систем. Недостатком акустических средств разведки перед электростатическими является то, что акустическая заметность может

быть снижена переводом аппарата в режим планирования. Также акустическую маскировку цели могут обеспечить внешние условия, такие как восходящие воздушные потоки. Средства электростатической маскировки при этом ограничиваются применением разрядников, которые, однако, не решают проблему кардинально.

Разумеется, стоит отметить, что электростатическая сигнатура цели, в отличие от акустической, не позволяет идентифицировать летающий объект. Поэтому средства электростатической разведки решают вопросы обнаружения и локации цели, а идентификация предполагается при помощи посылки мощного радиосигнала в указанную область пространства или осмотром пространства оптической системой обнаружения с большим увеличением, хоть и малым угловым полем.

Актуальность данной темы обоснована ростом числа беспилотных летательных аппаратов. Слежение за их движением необходимо для предотвращения нарушения данными аппаратами границ воздушных коридоров, в которых им позволено передвигаться, и наличие зон, где их появление запрещено.

Степень разработанности темы.

В настоящий момент времени среди отечественных и зарубежных работ существуют наработки по отдельным аспектам информационно-измерительных систем электростатической локации, но не существует ни только известного прототипа, но и не описан алгоритм обнаружения и локации БПЛА. Поэтому в настоящей работе описывается аппаратное, алгоритмическое и программное обеспечение данной системы.

Основные виды электростатических датчиков в середине 20-го века описал Имянитов И.М. В настоящее время получили распространение электростатические зонды и электростатические флюксометры ротационного типа.

Зонды являются простыми электростатическими пластинами, соединенными с землей через большое сопротивление (более 10^9 Ом). Электрический ток, образующийся при возникновении индуцированного на пластине заряда, характеризует скорость изменения напряженности электростатического поля. Оптимальная форма электродов и некоторые аспекты их использования для электростатической локации изучались исследовательской группой на предприятии Алмаз-Антей, военно-учебном центре Воронежа, в военной академии республики Беларусь в Минске (Нефедов Д.С.) и в Санкт-Петербургском университете Петра Великого.

Электростатические флюксометры также теоретически применимы для обнаружения БПЛА, что было показано на полигоне Владимирского государственного университета. Также исследовательская группа ВЛГУ под руководством Ефимова В.А. проводила работы по модернизации данного прибора в целях уменьшения дрейфа нуля. Хотя исследования проводились в большей части для использования данных приборов

в метеорологических исследованиях, также проверялась возможность использования электростатических флюксометров для обнаружения летательных аппаратов и предложена полезная модель локатора носителей источников заряда.

Полный цикл исследований с созданием промышленных систем по обнаружению заряженных частиц при помощи электростатической локации был проделан в смежной области исследований: электростатическом мониторинге состояния технических объектов. Наиболее близкой к рассматриваемой проблеме задачей в этой области является определение траекторий и скорости движения заряженных частиц, увлекаемых потоком жидкости или газа в трубопроводе. В этой области следует отметить работы исследовательской группы из британского университета Кента под руководством Йонг Яня.

В области цифровой обработки нестационарных сигналов можно отметить множество групп исследователей как отечественных, так и зарубежных. Исследованиями в области обработки электростатических сигналов и сигналов электрокардиограмм, которые схожи между собой, занимаются ученые китайских, британских и американских университетов. Стоит отметить таких ученых как Левис Р.Р. из учебной клиники Майо в Манчестере, Городницкий Н.А. из Санкт-Петербургского университета и Шен Пень Е. из политехнического университета Хэнаня.

Целью данной работы является аппаратное и алгоритмическое обеспечение возможности помехоустойчивого обнаружения и локации низколетящего летательного аппарата, пересекающего охраняемый периметр, на основе совокупности сигналов информационно-измерительной системы электростатической локации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать алгоритм определения траектории БПЛА, пересекающего охраняемый периметр при помощи информационно-измерительной системы на основе сигналов датчиков электростатического поля. Разработать алгоритмы по цифровой обработке сигналов датчиков электростатического поля для помехоустойчивого определения признаков сигнала.
2. Разработать математическую модель, описывающую процессы электростатической индукции на измерительном электроде, в том числе при подключении следящей обратной связи.
3. Разработать комплекс программ численного моделирования для описания полного процесса электростатической локации, включающей в себя как решение электростатической задачи, так и процесса обработки сигналов информационно-измерительной системы.

4. Сравнить разработанные алгоритмы определения траектории БПЛА по точности определения признаков сигнала при различном уровне соотношения сигнал/шум.
5. Произвести сравнение результатов численного и натурального эксперимента процесса электростатической индукции на измерительном электроде электростатического флюксметра ротационного типа на основе прототипа автора.

Объектом исследования является информационно-измерительная система электростатической разведки.

Предметом исследования являются датчики электростатического поля и системы обработки сигналов с них.

Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов состоит в следующем:

1. Определены на основе математической модели процесса электростатической локации необходимые признаки электростатического сигнала с трех датчиков, на основе которых можно определить траекторию полета заряженного объекта. Выделенные признаки (частотный и временной) не зависят от дрейфа нуля.
2. Обосновано, разработано и протестировано время-частотное преобразование измерительного сигнала путем свертки с рациональной анализирующей функцией. Преобразование сигнала при помощи данной функции во время-частотную область полностью соответствует тригонометрическому тождеству в пределах полупериода сигнала.
3. Разработан и реализован алгоритм имитационного моделирования цифровой обработки электростатических сигналов на основе анализа математической модели информационно-измерительной системы электростатической локации и время-частотного преобразования сигналов, и предложен алгоритм анализа время-частотного распределения сигнала, опирающийся на рассмотрение фазо-частотной характеристики. Данный алгоритм позволяет в два и более раз точнее определить временной признак сигнала по сравнению со стандартным при соотношении сигнал/шум менее 6.

Практическая значимость полученных в диссертационной работе результатов состоит в следующем:

1. Разработан программный комплекс, позволяющий применить рассмотренный метод для синтеза анализирующей функции и проработки алгоритма анализа фазо-частотной диаграммы. В качестве входных данных комплекс рассматривает уравнения функций и обрабатывает их с использованием ядра символьных вычислений, что позволяет минимизировать ошибки округлений и ускорить синтез.

2. Разработан электростатический флюксметр ротационного типа, обладающий большей точностью и надежностью измерений, чем существующие аналоги. Это обеспечивается новыми конструктивными особенностями по подавлению аддитивных помех. Схема измерения была обоснована численным экспериментом и результаты подтверждены в лабораторном эксперименте над прототипом. Получен патент на изобретение.
3. На основе математической модели процесса работы информационно-измерительной системы электростатической локации были определены области обнаружения БПЛА датчиками электростатического поля, определена конфигурация расположения датчиков и высоты обнаружения БПЛА.

Методология и методы исследования.

Для синтеза анализирующей функции, т.е. для нахождения коэффициентов рациональной функции, удовлетворяющей целевым требованиям, использован модифицированный метод наименьших квадратов. Модификация метода состоит в замене части уравнений системы требованиями к анализирующей функции. Для составления системы уравнений электростатический сигнал был преобразован в рациональную функцию с коэффициентами, найденными через градиентный поиск по целевой функции: суммы квадратов отклонений от теоретического сигнала. Все интегралы в системе уравнений были преобразованы через основную теорему о вычетах, уравнения были упрощены через методы символьного ядра системы компьютерной алгебры Maple. Уравнения, связывающие признаки сигнала с параметрами летящего БПЛА, получены на основе математической модели движения точечного заряда над бесконечной проводящей плоскостью. Математическая модель разработанного прототипа флюксметра описывалась уравнениями на основе законов Кирхгофа и электростатической индукции. Экспериментальная калибровочная характеристика была получена в соответствии с процедурой поверки, принятой для приборов данного типа.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модель работы информационно-измерительной системы электростатической локации, позволяющая на основе кинематических параметров полета БПЛА и уровня помех определить точность определения положения БПЛА при использовании различных алгоритмов цифровой обработки.
2. Алгоритмическое описание работы информационно-измерительной системы электростатической локации, включающей в себя:
 - Эмпирически подтвержденную электрическую схему измерения датчика электрического поля и обоснованные расчетом рекомендации по размещению датчиков, позволяющие убрать влияние аддитивных помех и дрейфа нуля.

- Алгоритм синтеза анализирующей функции для преобразования электростатического сигнала во время-частотную область, обеспечивающую выполнение основного тригонометрического тождества с отклонениями от него менее 1% в пределах $\pm 40\%$ от периода.
- Алгоритм обработки время-частотного распределения электростатического сигнала на основе его фазы, позволяющее определить признак времени точнее, чем общепринятый алгоритм на основе вейвлет преобразования Морле при соотношении сигнал/шум более 1.
- Алгоритм определения местоположения БПЛА информационно-измерительной системой электростатической локализации с ошибкой в 1 метр при соотношении сигнал/шум равным 4 и высоте 10 метров.

Достоверность обеспечена методами математического моделирования и проверкой полученных результатов в численном и лабораторном эксперименте.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на международной конференции по фундаментальным проблемам радиоэлектронного приборостроения Intermatic 2017 в МГУ МИРЭА, на 61-ой всероссийской научной конференции МФТИ (2018), на международной научной конференции Ломоносов 2019 в МГУ им. М.В. Ломоносова и на XI международной научно-практической конференции ВВСТ-2021 в АлГТУ им. И.И. Ползунова. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90028.

Личный вклад.

1. Собран экспериментальный стенд и проведены лабораторные эксперименты по получению калибровочной характеристики прибора.
2. Описаны математические модели пролета БПЛА через линию датчиков, электрической схемы измерения. Составлены программы по численному моделированию.
3. Разработан и обоснован алгоритм синтеза анализирующей функции с обеспечением требуемых характеристик время-частотного преобразования.
4. Разработан способ обработки фазо-частотной диаграммы.
5. Разработана и обоснована конструкция измерительного тракта и схема измерения электростатического флюксметра ротационного типа.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 10 печатных изданиях, 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 1 — в периодических научных журналах, индексируемых Web

of Science и Scopus, 4 — в тезисах докладов, 2 — в статьях, индексируемых в РИНЦ. Зарегистрирован 1 патент на изобретение.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по данной тематике, в первую очередь по смежной области электростатического мониторинга, так как полного цикла исследований в области электростатической локации обнаружено не было. На основе изученной литературы формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена рассмотрению используемых приборов и стратегий по измерению квазиэлектростатического поля и методов обработки сигналов в электростатическом мониторинге технических объектов и в локации объектов метеорологической природы. Также поставлен вопрос о комплексе решаемых задач подсистемой электростатической локации в составе системы по детектированию БПЛА.

Основными приборами для измерения напряженности электростатического поля являются электростатические зонды и электростатические флюксометры ротационного типа. С точки зрения поставленной задачи важно то, что электростатические зонды измеряют скорость изменения напряженности электростатического поля, а электростатические флюксометры саму напряженность. Но при этом даже электростатические флюксометры едва ли позволят опираться на абсолютные значения напряженности, ввиду наличия других источников поля, и наличие дрейфа нуля, различного для каждого прибора в системе электростатической локации.

В основе работы информационно-измерительной системы электростатической локации было решено использовать метод пролетного обнаружения заряженных частиц из области электростатического мониторинга. Для более полного мониторинга движения заряженных частиц в замкнутых трактах технических объектов используются двухмерные массивы датчиков вдоль и поперек потока жидкости или газа. Наиболее сильный сигнал получают датчики, к которым наиболее близко подошла траектория движения частицы, а скорость можно определить по времени между пересечениями поперечных периметров датчиков, которое определяется автокорреляционным методом. Для описания движения также используется время-частотное преобразование сигнала. Среди стандартных методов удовлетворительный результат показало время-частотное преобразование на основе сверток с модифицированной вейвлет функцией Морле. При этом анализ Фурье показал свою полную несостоятельность.

Краеугольным камнем цифровой обработки сигнала является время-частотное преобразование электростатического сигнала, т.е. перевод функции от времени к функции двух аргументов: признака частоты tr и времени ht . Для преобразования используется комплексная анализирующая функция:

$$Fc(t) = Fcre(t) + i \cdot Fcim(t), \quad (1)$$

где i — мнимая единица; $Fcre$ и $Fcim$ — реальная и мнимая часть функции свертки.

Пусть материнская анализирующая функция рассчитана на частоту $f = 1$ Гц. В соответствии с данной частотой получают N значений анализирующей функции с шагом по времени Δt , время-частотное преобразование на других частотах осуществляется путем изменения частоты выборки значения измерительного сигнала, для которого шаг по времени должен соответствовать $\Delta t/f$. Вычисление значения свертки таким образом осуществляется согласно формулам:

$$CR(f, \tau) = \sum_{i=0}^N [Ism((i - 0.5 \cdot N) \cdot \Delta t/f) \cdot Fcre((i - 0.5 \cdot N) \cdot \Delta t + \tau)]; \quad (2)$$

$$CI(f, \tau) = \sum_{i=0}^N [Ism((i - 0.5 \cdot N) \cdot \Delta t/f) \cdot Fcim((i - 0.5 \cdot N) \cdot \Delta t + \tau)], \quad (3)$$

где Δt — шаг по времени; τ — положение окна свертки; $Ism(t)$ — измерительный сигнал.

Уравнения (2) и (3) позволяют, примененные для определенного массива значений f и τ , позволяют получить точки узловой функции амплитуды и фазы по следующим уравнениям:

$$Amp(f, \tau) = \sqrt{CR^2(f, \tau) + CI^2(f, \tau)}; \quad (4)$$

$$Ph(f, \tau) = \arctan \frac{CR(f, \tau)}{CI(f, \tau)}. \quad (5)$$

В области электростатического мониторинга исследователи пришли к выводу, что из стандартных анализирующих функций наиболее подходящей для электростатических сигналов является модифицированная функция Морле.

Модифицированная функция Морле обладает необходимыми свойствами для обработки нестационарных сигналов, к классу которых относятся электростатические сигналы. Реальная и мнимая части данной функции ортогональны друг другу, функция обладает конечной энергией. Мнимая

часть данной функции имеет нулевое среднее значение вследствие своей нечетности. Действительная часть данной функции может быть приведена к нулевому среднему при определенных значениях коэффициента σ близких к единице.

В настоящее время группа исследователей британского университета в Кенте под руководством профессора по электронному приборостроению Йонг Яня использует специальные анализирующие функции в области электростатического мониторинга. Специальные функции синтезированные под конкретную задачу могут давать лучший результат.

Структура системы обнаружения БПЛА была предложена Нефедовым Д.С. в военной Академии Республики Беларусь и изображена на рисунке 1.

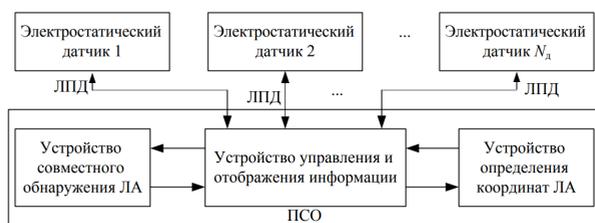


Рис. 1 — Структура информационно-измерительной системы электростатической локаци

Согласно рисунку 1, информационно-измерительная система электростатической локаци проводит указанную выше обработку в соответствующем устройстве. Совместно с устройством принятия решения об обнаружении и устройством управления и вывода информации они образуют пункт совместной обработки (ПСО), информации в который поступает от всех датчиков, расположенных вдоль охраняемого периметра, через линии передачи данных (ЛПД).

Для обнаружения БПЛА используется средства радиолокационной, радиотехнической, оптико-электронной, акустической и электростатической разведки. Последние два метода обладают по сравнению с остальными следующими возможностями:

1. Устойчивое автоматическое обнаружение малоскоростных мало-высотных БПЛА в условиях плохой оптической видимости и в условиях сложных рельефов местности.
2. Скрытное функционирование и сохранение работоспособности в условиях радиоэлектронного подавления.
3. Малые габариты, низкий уровень энергопотребление, хорошее сочетание эффективности к стоимости.

Таким образом, для данных средств необходимо обнаруживать низколетящие цели. В настоящем исследовании принято, что датчики расположены вдоль охраняемого периметра и должны засечь низколетящие цели, которые его пересекают.

Во второй главе и третьей главе рассматривается математическая модель процесса электростатической локации, математическая модель электростатического флюксометра прототипа автора, описывается время-частотное преобразование при помощи рациональной функции автора с математической формализацией его целевых свойств, которых необходимо достичь при синтезе.

Задача электростатической локации в настоящем исследовании рассматривалась как задача равномерного движения точечного заряда над бесконечной плоскостью. Датчики устанавливались на прямой линии вдоль охраняемого периметра. Геометрический вид задачи представлен на рисунке 2.



Рис. 2 — Условие электростатической задачи движения БПЛА (вид сверху)

При пролете БПЛА возникают сигналы определенной формы, обладающие двумя характерными признаками, которые полезны для определения траектории пролета. Их аналитическая форма в рамках выбранной математической модели выражается одним из двух уравнений:

$$I_{smf}(t) = C_f \frac{1}{((t - t_p)^2 + ht^2)^{3/2}}; \quad (6)$$

$$I_{smp}(t) = -C_p \frac{t}{((t - t_p)^2 + ht^2)^{3/2}}, \quad (7)$$

где C_f и C_p — постоянные коэффициенты; t — время; t_p — признак времени электростатического сигнала; ht — признак частоты электростатического сигнала.

Уравнение (6) и уравнение (7) описывают сигнал электростатического флюксметра и электростатического зонда соответственно с точностью до постоянной составляющей без учета помех. Задачей обработки электростатического сигнала является помехоустойчивое определение признаков ht и tr . С данными признаками взаимосвязаны параметры траектории летательного аппарата.

В Таблице 1 представлены характерные границы области обнаружения датчиков при определенной минимально обнаруживаемой амплитуде сигнала и заряде на БПЛА.

Таблица 1 – Граница зоны обнаружения БПЛА

| | Эл. флюксметр | | | Эл. зонд | | | |
|----------------|---------------|-----|-----|--------------------|----|-----|-----|
| | Amp = 5 В/м | | | Amp = 10 В/(м · с) | | | |
| q , мкКл | 1 | | 100 | 1 | | 100 | |
| v , м/с | от 1 до 50 | | | 2 | 10 | 2 | 10 |
| y_{\max} , м | 15 | 150 | 70 | 4 | 7 | 19 | 32 |
| h_{\min} , м | 2,1 | 21 | 2 | <1 | <1 | 1 | 1,9 |
| h_{\max} , м | 40 | 403 | 415 | 10,5 | 18 | 49 | 83 |

В таблице h_{\max} и h_{\min} в таблице 1 обозначают принятую для датчиков минимальную и максимальную высоту обнаружения на расстоянии максимального допускаемого удаления от датчиков по горизонтали y_{\max} . Данные расстояния зависят от скорости v , трибоэлектрического заряда q и воспринимаемой системой минимальной амплитуды полезного сигнала Amp.

Задачей цифровой обработки является нахождение выделенных признаков сигнала. Для этого измерительный сигнал обоих типов измерителей рассматривается как рациональная функция. Анализирующий сигнал рассматривался как комплексная функция, чья реальная и мнимая часть представляется в виде рациональной функции со знаменателем, идентичным знаменателю измерительного сигнала:

$$F_{\text{cre}}(t) = \frac{P_4 \cdot t^8 + P_3 \cdot t^6 + P_2 \cdot t^4 + P_1 \cdot t^2 + P_0}{(x + A^2) \cdot (x + B^2)^2 \cdot (x + C^2)^2}; \quad (8)$$

$$F_{\text{cim}}(t) = \frac{K_3 \cdot t^7 + K_2 \cdot t^5 + K_1 \cdot t^3 + K_0 \cdot t^1}{(x + A^2) \cdot (x + B^2)^2 \cdot (x + C^2)^2}, \quad (9)$$

где P_j, K_j, A, B, C – постоянные коэффициенты.

Подбор необходимой анализирующей функции заключался в определении коэффициентов числителя P_j и K_j , чтобы в определенном диапазоне значений τ , $CR(f, \tau)$ и $CR(f, \tau)$ изменялись как синус и косинус соответственно. Использование рациональных функций оправдано из следующих соображений:

1. Подобие измерительного сигнала рациональной функции.

2. Возможность преобразовать неопределенный интеграл свертки в многочлен через основную теорему о вычетах функции.
3. Линейная зависимость частных производных свертки от параметров числителя, что упрощает использование метода наименьших квадратов.
4. Естественное обеспечение ортогональности и затухания функции.

Для определения коэффициентов P_j и K_j была составлена программа на языке Maple с использованием символьных операций. Коэффициенты P_j были рассчитаны следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial P_0} \sum_{j=0}^N (\cos(\frac{2 \cdot cf \cdot \pi \cdot j}{N}) - Conev(j/N))^2 = 0; \\ \frac{\partial}{\partial P_1} \sum_{j=0}^N (\cos(\frac{2 \cdot cf \cdot \pi \cdot j}{N}) - Conev(j/N))^2 = 0; \\ \frac{\partial}{\partial P_2} \sum_{j=0}^N (\cos(\frac{2 \cdot cf \cdot \pi \cdot j}{N}) - Conev(j/N))^2 = 0; \\ \int_{-\infty}^{\infty} Fcod(t) \cdot dt = Cz; \\ \sum_{j=1}^{10} Fre(\frac{i+40}{5}) = 0, \end{array} \right. \quad (10)$$

где Cz — околонулевое значение; cf — коэффициент сжатия;

Отличием системы уравнений (10) от классического МНК является наличие последнего уравнения, описывающего затухание функции на удалении и предпоследнего уравнения описывающего равенство нулю среднеинтегрального значения. Замена строго нуля на Cz связано с ошибками дискретизации, которые появляются при переносе полученной анализирующей функции в цифровую форму. Коэффициент cf подбирается в алгоритме таким, чтобы свертка для выбранной частоты была максимальной. Расчет коэффициентов K_j проводился аналогично, за исключением уравнения с Cz так как равенство нулю для нечетной функции выполняется автоматически.

Минимально воспринимаемая амплитуда зависит от соотношения сигнал/шум и возможности обработки сигнала для данного соотношения. Речь идет о погрешности определения временного ht и частотного признака электростатического сигнала.

В **четвертой главе** приводятся результаты численных и лабораторных экспериментов, оценивается эффективность разработанных алгоритмов.

По описанному выше алгоритму была получена рациональная анализирующая функция, чьи коэффициенты представлены в таблице 2.

Рост погрешности предсказания положения БПЛА при снижении соотношения сигнал/шум для обоих видов функции при обработке сигнала электростатического флюксметра представлен в таблице 3.

Таблица 2 — Коэффициенты функций

| Электростатический флюксметр | | | | Электростатический зонд | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|-------------------------|----------|----------|----------|
| Зн. | Сигнал | Реальная | Мнимая | Общие | Сигнал | Реальная | Мнимая |
| <i>A</i> | S_0 | K_0 | P_0 | <i>A</i> | S_0 | P_0 | K_0 |
| 1.603 | 498312 | 71857.8 | 116877 | 1.285 | -74120 | 23443.7 | -15397.2 |
| <i>B</i> | S_1 | K_1 | P_1 | <i>B</i> | S_1 | P_1 | K_1 |
| 3.276 | 1.30500 | 123687 | 212966 | 2.362 | -17526 | 29454.8 | -53463.7 |
| <i>C</i> | S_2 | K_2 | P_2 | <i>C</i> | S_2 | P_2 | K_2 |
| 5.183 | -5288.83 | -5075.99 | -76160.3 | 4.755 | -283.863 | -27491.0 | 8284.06 |
| ht | | K_3 | P_3 | ht | | P_3 | K_3 |
| 2 | | -5075.99 | 1.660 | 2 | | 1109.22 | -2.725 |
| | | | P_4 | | | P_4 | |
| | | | -1.2064 | | | -0.8838 | |

Таблица 3 — Погрешность определения признаков электростатического сигнала

| Анализирующая функция | сигнал/шум | $\epsilon_{ht}, \%$ | $\epsilon_{tp}, \%$ | $\Delta x, \text{ м}$ | $\Delta y, \text{ м}$ | $\Delta z, \text{ м}$ |
|-----------------------|------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Вейвлет Морле | 3 | 0 | 2% | 1,5 | 2,6 | 0,1 |
| Вейвлет Морле | 2 | 0 | 4% | 3 | 5,2 | 0,2 |
| Рациональная функция | 3 | 0,1 | 0,1 | 0,39 | 0,41 | 0,05 |
| Рациональная функция | 2 | 1,1 | 1 | 4,5 | 3,6 | 0,55 |

В **заклЮчении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Анализ математической модели пролета БПЛА мимо датчика позволил определить уравнения для нахождения траектории на основе признаков сигналов датчиков информационно-измерительной системы электростатической локации.
2. Был разработан алгоритм синтеза рациональной анализирующей функции для цифровой обработки для помехоустойчивого извлечения признаков электростатического сигнала, который выполняется программным способом за приемлемое машинное время. Погрешность соответствия целевым свойствам составила менее 1% в пределах $\pm\pi$
3. На основе численного моделирования были отработаны алгоритмы обработки время-частотного распределения электростатического сигнала, полученного при помощи синтезированной рациональной функции и общепринятой в электростатическом мониторинге модифицированной вейвлет функцией Морле.

4. Численное моделирование показало, что метод на основе рациональной функции более помехоустойчив при определении временного признака электростатического сигнала (погрешность ниже в несколько раз при соотношениях сигнал/шум от 2 до 6), в то время как метод на основе вейвлет функции дает более точное значение признака частоты в условиях помех.
5. Была определена область реагирования отдельного датчика и составлены рекомендации по определению максимального шага датчиков в периметре.
6. На основе численного и лабораторного эксперимента была обоснована запатентованная конструкция электростатического флюксметра ротационного типа. Было изучено влияние параметров измерительного тракта и схемы измерения электростатического флюксметра ротационного типа на чувствительность измерений и дрейфа нуля. Составлены рекомендации по выбору расстояний между экранирующим и измерительным электродом, выбором параметров элементов обратной связи и скорости вращения экранирующего электрода.
7. Чувствительность полученного прибора составила 0,087 В/м при площади измерительных электродов 0,13 дм², погрешность не более 1 В/м (без учета дрейфа нуля) при диапазоне измеряемого поля ± 1000 В/м. Это сопоставимо с данными, приводимыми владимирскими и санкт-петербургскими исследователями, хотя единственный найденный сертифицированный измеритель обладает погрешностью 50 В/м (посчитано на основе указанной относительной погрешности).
8. Для выполнения поставленных задач был создан комплекс программ для численного моделирования работы информационно-измерительной системы электростатической локации. Кроме того, был разработан и создан прототип электростатического флюксметра ротационного типа.

Публикации автора по теме диссертации

Работы, опубликованные в изданиях из перечня ВАК РФ

1. *Скрябин Ю. М.* Определение коэффициентов рациональной анализирующей функции с помощью метода наименьших квадратов [текст] / Ю. М. Скрябин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. — 2024. — No 1. — с. 5–13. — (0,5 /0,5 п. л.; ВАК).
2. *Потехин Д. С.* Размещение датчиков информационно-измерительной системы локации летательных аппаратов [текст] / Д.С. Потехин, Ю. М. Скрябин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета — 2024. — No 89. — с. 21–30. — (0,5 /0,5 п. л.; ВАК).
3. *Скрябин Ю. М.* Влияние помех на точность определения местоположения летательного аппарата информационно-измерительной системой электростатической локации [текст] / Ю. М. Скрябин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. — 2024. — No 4. — с. 20–29. — (0,5 /0,5 п. л.; ВАК).

Работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах

4. *Skryabin Y.* Synthesis of the Rational Analyzing Function for Feature Extraction of Signals from the Electrostatic Location System [текст] / Y. Skryabin, D. Potekhin // Communications in Computer and Information Science. — 2023. — т. 1733. — с. 250–261. — (Scopus).

Патенты

5. *Пат. на изобретение № 2722477 Рос. федерация*, МПК 7 G 01 R 29/00. Электростатический флюксметр [текст] / Д. С. Потехин, Ю. Скрябин, Е. Тетерин (Российская Федерация) ; заявитель ООО "Клевер". — заявл. 24.07.2019 ; опубли. 01.06.2020, Бюл. No 16 (Рос. Федерация). — 12 с. : ил.

Работы, опубликованные в других изданиях

6. *Скрябин Ю. М.* Определение траектории горизонтального пролета беспилотного летательного аппарата через линию электростатических датчиков [текст] / Ю. М. Скрябин, Д. С. Потехин // Труды МАИ. — 2019. — No 105. — с. 19. — Режим доступа: <https://trudymai.ru/published.php?ID=105747>.
7. *Скрябин Ю. М.* Рациональная анализирующая функция для точного определения параметров электростатического

- сигнала [текст] / Ю. М. Скрябин, Д. С. Потехин // Труды МАИ. — 2021. — No 119. — с. 32. — Режим доступа: <https://trudymai.ru/published.php?ID=159792>.
8. *Скрябин Ю. М.* Границы обнаружения БПЛА системой датчиков электростатического поля [текст] / Ю. М. Скрябин, Д. С. Потехин, Е. А. Чащин // Труды 61-ой всероссийской научной конференции МФТИ. 19-25 ноября 2018 года. Прикладная математика и информатика. — 2018. — с. 81—82.
 9. *Скрябин Ю. М.* Влияние емкости измерительного электрода электростатического флюксметра на чувствительность измерений [текст] / Ю. М. Скрябин, Д. С. Потехин // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. — 2017. — т. 17, No 5. — с. 1235—1238.
 10. *Скрябин Ю. М.* Сигналы электростатических датчиков при детектировании БПЛА [текст] / Ю. М. Скрябин, П. Д. С. // Сборник тезисов XXVI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Ломоносов-2019; секция «Вычислительная математика и кибернетика». — 2019. — с. 104—106.
 11. *Скрябин Ю. М.* Программный алгоритм синтеза рациональных анализирующих функций для системы электростатической локации [текст] / Ю. М. Скрябин, П. Д. С. // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. т. 6. — 2022. — с. 38—43.

Скрябин Юрий Михайлович

Информационно-измерительная система электростатической локации БПЛА и
её алгоритмическое обеспечение

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____