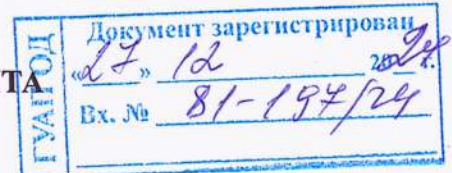


ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Коновалова Александра Анатольевича
на диссертационную работу
Тарасенкова Андрея Александровича



«Оценка высоты воздушного судна методом фазовой автоподстройки опорного сигнала в радиовысотомере непрерывного излучения»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
2.2.16 – Радиолокация и радионавигация

Актуальность темы диссертации

Бортовые радиовысотомеры (РВ) непрерывного излучения являются широко распространенными устройствами, обеспечивающими безопасность полетов летательных аппаратов (ЛА) различных классов. В связи с бурным развитием беспилотной авиации возрастает потребность в недорогих, компактных и вместе с тем достаточно точных устройствах измерения высоты, что требует поиска новых технических решений. Одним из вариантов является использование в следящих высотомерах малых высот метода обработки, основанного на фазовой автоподстройке контура слежения за средней частотой сигнала биений (СБ). Ожидается, что эта схема может обеспечить высокую точность оценки высоты без существенного увеличения вычислительных затрат. Практическая реализация схемы с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ) в РВ требует решения ряда задач, которым посвящена диссертация Тарасенкова А.А., что свидетельствует о ее актуальности, а также о научной и практической значимости.

Содержание диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и двух приложений. Работа содержит 72 рисунка и 5 таблиц. Список использованной литературы включает 134 наименования. Объем работы – 151 страница.

Во введении дана краткая характеристика радиотехнических методов измерения высоты и показано место, которое занимает среди них предлагаемый в работе метод, основанный на автоподстройке контура слежения за фазой сигнала биений (СБ). Определены объект и предмет исследования, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору существующих и перспективных радиовысотомеров непрерывного излучения. Приведена классификация алгоритмов обработки радиолокационной информации в современных радиовысотомерах, при этом рассматриваются схемы РВ с прямым измерением частоты СБ, с синхронным приемом, со следящим измерителем частоты, с автоподстройкой периода модуляции, методы на основе спектрального анализа и с фазовой автоподстройкой опорного сигнала. Проанализированы достоинства и недостатки указанных схем, сформулированы задачи, которые необходимо решить в процессе синтеза метода измерения высоты на основе оценки фазы СБ измерительным контуром ФАПЧ.

Вторая глава работы посвящена синтезу математических моделей и анализу флуктуационных ошибок при оценке высоты в радиовысотомерах непрерывного излучения следящего типа. Разработаны математические модели следящих радиовысотомеров с разными схемами построения: со следящим измерением высоты (СИЧ), с автоподстройкой

периода модуляции (АПМ), с измерительным контуром ФАПЧ. Для повышения точности измерителя при низких значениях отношения сигнал/шум (ОСШ) предложена модификация контура ФАПЧ за счет добавления предварительного полосового фильтра и фазового фильтра наименьших квадратов. Проведен теоретический анализ зависимости смещения и СКО оценки высоты в зависимости от величины ОСШ.

Третья глава посвящена сравнительному анализу точности оценки высоты в условиях отражения зондирующего сигнала от протяженной шероховатой поверхности и влияния эффекта Доплера для разных алгоритмов (АПМ, СИЧ, ФАПЧ), которое показало преимущество схемы с ФАПЧ и отсутствие влияния доплеровского расширения спектра в схеме с ФАПЧ на скоростях носителя до 70 м/с.

В четвертой главе представлены результаты оптимизации измерительного контура ФАПЧ, заключающейся в выборе типа частотной модуляции зондирующего сигнала, обеспечивающего более высокую потенциальную точность оценки при фиксированной ширине спектра, и выборе петлевого фильтра для контура ФАПЧ. Обосновано преимущество использования сигнала с гармонической ЧМ (по сравнению с симметричной и несимметричной ЧМ), который обладает меньшей чувствительностью к расширению спектра, вызванного шероховатой поверхностью, при этом получены границы Крамера-Рао для СКО оценок частоты биений при использовании указанных сигналов. Исследовано применение стационарных линейных фильтров первого и второго порядка и фильтра Калмана в качестве петлевого сглаживающего фильтра в контуре ФАПЧ, на основе которого рекомендовано применение фильтра Калмана, обладающего существенно меньшим временем переходного процесса и динамической ошибкой (при несколько большей флуктуационной ошибке).

В пятой главе представлены результаты полунатурного (с использованием линий задержек) и натурного (с использованием макета) экспериментов по определению точностных характеристик РВ непрерывного излучения с контуром ФАПЧ, подтвердивших работоспособность предложенной схемы, а также сделанные ранее выводы о предпочтительности использования сигнала гармонической ЧМ.

В заключении автор приводит перечень полученных результатов, делает основные выводы по диссертационному исследованию, а также определяет направления дальнейших исследований, в частности, из указанных особый интерес представляет оптимальный (по критерию максимальной точности) синтез формы частотной модуляции сигнала.

В приложениях представлены документы, подтверждающие внедрение основных результатов диссертационной работы.

Текст диссертации отличается подробным изложением предметной области и доходчивым описанием методов и результатов исследования. Материал изложен в логической последовательности, отвечающей всем необходимым требованиям, имеет целостность и внутреннее единство содержания. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, четко обоснованы.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, содержит информацию о ключевых положениях и результатах работы, позволяет сделать заключение о научном и техническом уровне работы.

Степень достоверности и обоснованности научных результатов

Достоверность результатов исследований подтверждена корректным использованием аналитических расчетов, методов математической статистики, теории радиолокации и теории

распространения радиоволн; использованием современных методов компьютерного моделирования; совпадением теоретических результатов с результатами полунатурных и натуральных экспериментов. Полученные автором результаты и выводы не противоречат общим представлениям о функционировании алгоритмов обработки сигналов в радиолокационных системах.

Апробация результатов исследования

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на нескольких научно-технических конференциях (Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 2021 г. и 2023 г.; Всероссийская научно-техническая конференция «Радиовысотометрия 2021», АО «УПКБ «Деталь», г. Каменск-Уральский, 2021 г.; Международная научная конференция «Волновая электроника и информационные системы», Санкт-Петербург, 2022 г. и 2023 г. и др.).

Публикации по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 18 работах, в числе которых 5 статей в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК; 2 опубликованы в изданиях РИНЦ; 1 в материалах конференции, индексируемой базой данных Scopus; 9 опубликованы в материалах конференций, индексируемых РИНЦ; получен 1 патент на полезную модель.

Научная новизна результатов диссертационной работы

Полученные результаты обладают научной новизной, требуемой для диссертаций, представляемых к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук. Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Для оценки высоты в РВ с непрерывным ЧМ сигналом синтезирован и исследован алгоритм, основанный на использовании контура ФАПЧ.
2. Для повышения точности схемы с ФАПЧ при снижении ОСШ предложено применение в контуре ФАПЧ предварительного полосового фильтра и фазового фильтра, синтезированного методом наименьших квадратов.
3. Предложено использование фильтра Калмана в качестве петлевого сглаживающего фильтра в контуре ФАПЧ, что позволило увеличить быстродействие измерительного контура ФАПЧ.
4. Для РВ с контуром ФАПЧ теоретически и экспериментально обосновано преимущество применения гармонической частотной модуляции над симметричной и несимметричной линейной частотной модуляциями.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в следующем.

1. Предложен оригинальный метод обработки сигнала биений в радиовысотометре непрерывного излучения с использованием контура ФАПЧ.
2. Показано, что оценки высоты, формируемые таким измерителем, стремятся к оптимальным по критерию максимума правдоподобия.
3. Получены нижние границы Крамера-Рао для дисперсии оценки высоты при использовании разных типов частотной модуляции, доказывающие, что гармонический тип

частотной модуляции обеспечивает более высокую точность по сравнению с традиционно используемыми линейными типами.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем.

1. Синтезированы математические модели РВ непрерывного излучения следящего типа, в том числе модель РВ с измерительным контуром ФАПЧ, обеспечивающие инструментарий для исследований и отладки алгоритмов обработки СБ.

2. Разработан алгоритм предварительной полосовой фильтрации и синтезирован петлевой сглаживающий фильтр на основе фильтра Калмана для измерительного контура ФАПЧ, позволяющие повысить точность и быстродействие РВ.

3. Выбран тип частотной модуляции зондирующего сигнала, обеспечивающий повышение точности оценки высоты.

4. Проанализировано влияние эффекта расширения спектра сигнала биений, вызванного шероховатостью отражающей поверхности и эффектом Доплера, на точность оценивания высоты.

5. Разработан и построен макет приемопередающего устройства радиовысотомера непрерывного излучения для лабораторных и натурных испытаний, проведены экспериментальные исследования.

Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе имеются следующие замечания.

1. В работе использованы достаточно простые модели отражения электромагнитных волн от подстилающей поверхности (цилиндрическая для морской поверхности и двумерная для земной) и для расширения спектра СБ, вызванного доплеровским смещением частоты.

2. Форма фильтра Калмана, использованная в качестве петлевого сглаживающего фильтра в контуре ФАПЧ, подразумевает, что высота шероховатости подстилающей поверхности описывается некоррелированным гауссовским случайным процессом, тогда как на самом деле он коррелированный, а при наличии отражений от местных предметов – негауссовский. Кроме того, в ФК заложена модель с постоянной высотой, в условиях реальной эксплуатации РВ высота будет изменяться, что также должно быть учтено в схеме фильтра.

3. Не рассмотрено влияние характеристик ФАПЧ на точностные параметры высотомера: влияние уровня фазовых шумов, побочных спектральных составляющих, влияние частотной характеристики фильтра, которая должна одновременно обеспечить с одной стороны, стабильность работы опорного генератора и низкий уровень шума, с другой стороны малое время реакции и достаточную полосу захвата петли ФАПЧ.

4. В качестве одного из преимуществ схемы РВ с контуром ФАПЧ указаны низкие вычислительные затраты и более простая схемотехника по сравнению с конкурирующими алгоритмами, однако соответствующего сравнительного анализа в диссертации нет.

В качестве общего замечания следует отметить, что в диссертации имеется несоответствие между обозначенной областью применения разработанного метода и методами, с которыми он сравнивается. Если предложенный метод предназначен для реализации в РВ малых высот, размещаемых на БПЛА, то сравнивать его следует прежде всего с 24 ГГц радарными, а не с традиционными классическими РВ, предназначенными для больших ЛА. При этом следует принимать во внимание не только точность, но и скрытность, массогабаритные показатели, энергопотребление.

Приведенные замечания не снижают научную ценность результатов диссертационной работы и не влияют на ее положительную оценку.

Итоговое заключение

Диссертация Тарасенкова Андрея Александровича «Оценка высоты воздушного судна методом фазовой автоподстройки опорного сигнала в радиовысотомере непрерывного излучения» является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые, научно обоснованные технические решения, имеющие значение для развития радиолокационных методов измерения высоты, и решена важная научно-техническая задача разработки алгоритма обработки сигнала биений в радиовысотомере непрерывного излучения на основе принципа фазовой автоподстройки, позволяющего повысить точность измерений в условиях сложного характера отражения зондирующего сигнала от протяженной шероховатой поверхности.

Настоящая работа соответствует паспорту научной специальности 2.2.16 – «Радиолокация и радионавигация». По актуальности рассматриваемых вопросов, научной новизне, практической значимости и достоверности результатов, личному вкладу автора, полноте опубликования результатов в ведущих рецензируемых изданиях работа Тарасенкова Андрея Александровича соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, содержащимся в Разделе II «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (в редакции от 16.10.24).

Автор диссертационной работы, Тарасенков Андрей Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.16 – «Радиолокация и радионавигация».

«24» декабря 2024 года

Официальный оппонент,
ведущий инженер НИИ «Прогноз»
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», к. т. н.

А. А. Коновалов

Подпись Коновалова Александра Анатольевича заверяю

Начальник Отдела диссертационных советов
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», к.э.н.



Т.Л. Русяева

Коновалов Александр Анатольевич, кандидат технических наук по специальности 2.2.16 (05.12.14) – Радиолокация и радионавигация, ведущий инженер НИИ «Прогноз» Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет «ЛЭТИ» им. Ульянова (Ленина)».

Адрес: 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, литера Ф.

Тел.: 8 (812) 234-46-51.

E-mail: info@etu.ru.