

На правах рукописи



Тарасенков Андрей Александрович

**ОЦЕНКА ВЫСОТЫ ВОЗДУШНОГО СУДНА МЕТОДОМ ФАЗОВОЙ
АВТОПОДСТРОЙКИ ОПОРНОГО СИГНАЛА В РАДИОВЫСОТОМЕРЕ
НЕПРЕРЫВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальность 2.2.16 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» на кафедре радиотехнических систем

Научный руководитель	Монаков Андрей Алексеевич доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты	Синицын Евгений Александрович , доктор технических наук, профессор АО «Навигатор», Научно-технический отдел связи, главный научный сотрудник Коновалов Александр Анатольевич кандидат технических наук ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», НИИ «Прогноз», ведущий инженер
Ведущая организация	Акционерное общество «Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь» (г. Каменск-Уральский)

Защита состоится «21» января 2025 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.384.01 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67. Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета <http://dissov.guap.ru>.

Автореферат разослан «19» ноября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.384.01
кандидат технических наук



Сергеев Александр Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

На борту воздушного судна (ВС) традиционно используются два типа измерителей высоты: барометрические высотомеры и радиовысотомеры (РВ). Барометрические измерители исторически являются первыми бортовыми приборами для измерения высоты полета и в настоящее время уже достаточно хорошо разработаны. Радиовысотомеры, в силу более сложных физических принципов, лежащих в основе их работы, а также интенсивного развития радиоэлектроники и вычислительной техники, до настоящего времени представляют широкий горизонт для исследований. Бортовые РВ обеспечивают решение целого ряда задач управления полетом ВС: полет с огибанием рельефа местности, посадка на гладкую водную поверхность, посадка ВС в условиях недостаточной видимости, автоматическая посадка. Здесь бортовые РВ малых высот являются незаменимым средством обеспечения системы управления ВС пилотажной информацией. Кроме того, в настоящее время бортовые РВ используются в качестве источников навигационной информации, так как в составе инерциально-корреляционной системы позволяют определить текущие координаты ВС. Важность бортовых РВ в современной авиации сложно переоценить, поэтому данные измерители являются объектом исследований диссертационной работы.

Принято выделять две группы таких приборов: РВ малых высот, работающих в диапазоне высот от 0 до 1500 м, и РВ больших высот, которые измеряют высоты более 1500 м. Это деление носит условный характер и связано оно с различием в принципах построения РВ. В РВ больших высот используется традиционный для радиолокации импульсный метод измерения дальности. Радиовысотомеры малых высот используют непрерывное частотно модулированное (ЧМ) излучение и частотный метод измерения расстояний. Для этой группы измерителей характерно существование максимальной высоты измерений поскольку при увеличении высоты пропорционально увеличивается площадь области на подстилающей поверхности, которая участвует в формировании отраженного сигнала. Это увеличение приводит к появлению шума дальности – одного из явлений, составляющих предмет исследования радиолокации протяженных целей. Негативным проявлением шума дальности в радиовысотомерах является увеличение ошибок оценивания с увеличением высоты.

Частотный метод измерения расстояний основан на формировании в приемнике сигнала биений (СБ) – выходного сигнала смесителя приемника, на входы которого подаются излучаемый и принимаемый сигналы. Средняя частота СБ вне зависимости от типа ЧМ излучаемого сигнала прямо пропорциональна высоте полета. Коэффициент пропорциональности является постоянной величиной, зависящей от скорости изменения частоты излучаемого сигнала. Для измерения высоты в РВ осуществляется оценка средней частоты СБ. Эта оценка может быть реализована разными способами. В простейших РВ происходит обычный подсчет числа пересечений сигналом нулевого уровня за период модуляции. В более совершенных приборах такая оценка выполняется методами спектрального анализа. Существуют также РВ следящего типа. В таких РВ оценка высоты осуществляется путем изменения периода ЧМ излучаемого сигнала, при котором частота СБ поддерживается примерно постоянной специальным следящим контуром.

В настоящей работе исследуется новый метод обработки, основанный на фазовой автоматической подстройке опорного сигнала (ОС), который равен ожидаемому на текущем периоде модуляции СБ. Для этого измеритель РВ содержит управляемый генератор ОС и контур автоматической подстройки фазы, который отслеживает фазу СБ.

Объектом исследования работы являются алгоритмы и методы обработки сигналов в радиовысотомерах непрерывного излучения.

Предмет исследования - контур фазовой автоподстройки опорного сигнала в системе обработки сигнала биений радиовысотомера непрерывного излучения.

Цель работы - повышение качества измерений высоты воздушного судна радиовысотомером непрерывного излучения путем разработки алгоритмов оценки сигнала биений контуром фазовой автоматической подстройки опорного сигнала.

В работе поставлены и решаются следующие основные задачи.

1. Проведение аналитического обзора современного уровня и тенденций развития радиовысотомеров непрерывного излучения и используемых в них алгоритмов обработки сигналов.

2. Разработка алгоритмов обработки сигнала биений и функциональной схемы РВ с контуром фазовой автоматической подстройки опорного сигнала.

3. Сравнительный анализ точности оценок высоты в РВ разных типов в условиях воздействия шумов измерителя и расширения спектра сигнала биений, вызванного шероховатостью отражающей поверхности и эффектом Доплера.

4. Проведение экспериментальных исследований предлагаемого измерителя.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы теории оптимальной обработки сигналов, математического моделирования, математической статистики, теории систем автоматического регулирования.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем.

1. Для обработки СБ и оценки высоты в РВ непрерывного излучения предложен алгоритм, основанный на использовании контура фазовой автоподстройки опорного сигнала.

2. Предложен способ повышения точности РВ с измерительным контуром ФАПЧ за счет применения специального фазового фильтра, синтезированного методом наименьших квадратов.

3. Предложен способ увеличения быстродействия измерительного контура ФАПЧ за счет применения фильтра Калмана в качестве петлевого сглаживающего фильтра.

4. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены результаты по выбору типа ЧМ для РВ с контуром ФАПЧ.

Теоретическая значимость результатов проведенных исследований заключается в следующем.

1. Предложен оригинальный метод обработки СБ в РВ непрерывного излучения с использованием контура ФАПЧ.

2. Показано, что оценки высоты, формируемые таким измерителем, стремятся к оптимальным по критерию максимума правдоподобия, из чего следует, что системы ФАПЧ помимо традиционного применения для синтеза или синхронизации гармонических сигналов, могут быть использованы в более широком классе задач оценки параметров сложных периодических процессов.

3. Полученные нижние границы Крамера-Рао для дисперсии оценки высоты при использовании разных типов ЧМ доказывают, что гармонический закон частотной модуляции в РВ непрерывного излучения обеспечивает более высокую точность по сравнению с линейными типами ЧМ.

Практическая значимость полученных результатов исследования определяется следующим.

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

2. Разработаны алгоритмы, позволяющие повысить точность РВ с измерительным контуром ФАПЧ.

3. Разработан петлевой сглаживающий фильтр для измерительного контура ФАПЧ на основе фильтра Калмана, позволяющий повысить быстродействие измерительной системы.

4. Определен закон частотной модуляции излучаемого сигнала РВ, обеспечивающий увеличение точности оценки высоты.

5. Исследовано влияние эффекта расширения спектра СБ, вызванного шероховатостью отражающей поверхности и эффектом Доплера, на точность РВ непрерывного излучения.

6. Разработан и построен макет приемопередающего устройства РВ непрерывного излучения для лабораторных и натуральных испытаний.

7. Проведены сравнительные экспериментальные исследования точности РВ в условиях отражения зондирующего сигнала от шероховатой поверхности.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов подтверждается тем, что:

- исследования опираются на фундаментальные положения математической статистики, радиолокации и теории распространения радиоволн;
- использованы современные методы компьютерного моделирования;
- результаты компьютерного моделирования подтверждены данными полунатурных и натуральных экспериментов.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: Научная сессия ГУАП, посвященная Дню космонавтики, Санкт-Петербург, 2020 г.; 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.

Публикации. Содержание диссертации изложено в 18 работах, в числе которых: 5 статей в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК; 1 патент на полезную модель; 2 работы опубликованы в изданиях РИНЦ; 1 работа в материалах конференции, индексируемой базой данных Scopus; 9 работ опубликованы в материалах конференций, индексируемых РИНЦ.

Внедрение результатов диссертационной работы. Результаты теоретических и практических исследований, разработанные математические модели и алгоритмы, результаты расчетов, методики испытаний и макетные образцы, реализованы на предприятии ООО «КОНТУР-НИИРС» в рамках НИР по теме «Контур-РВ».

Личный вклад автора. В процессе работы над диссертацией автором лично и при его непосредственном участии:

- разработаны основные теоретические положения, использованные при создании РВ с контуром ФАПЧ;
- разработаны и реализованы в среде моделирования процессов и систем Matlab/Simulink математические модели РВ непрерывного излучения, использующие различные принципы обработки СБ;
- получены уравнения для потенциальной точности оценок высоты РВ при непрерывном излучении с различными типами ЧМ;
- выполнено имитационное моделирование и проведены сравнительные исследования точности оценок, полученных в РВ с различными способами обработки СБ;
- построен макетный образец РВ непрерывного излучения с контуром ФАПЧ и предложена методика проведения лабораторных и натуральных испытаний;
- проведены экспериментальные исследования РВ с контуром ФАПЧ в лабораторных условиях и в условиях натуральных испытаний.

На защиту выносятся следующие основные положения.

1 Использование в следящем радиовысотомере непрерывного излучения контура фазовой автоподстройки, в состав которого входят генератор опорного сигнала, измеритель среднего значения разности фаз сигнала биений и опорного сигнала и фазовый фильтр наименьших квадратов, позволяет оптимально по критерию максимума правдоподобия оценивать высоту воздушного судна.

2 Математические и натурные эксперименты показывают, что радиовысотомер с контуром фазовой автоматической подстройки опорного сигнала менее чувствителен к расширению спектра СБ, возникающего вследствие шероховатости отражающей поверхности, и

позволяет повысить точность измерения высоты над шероховатой поверхностью на 50% по сравнению с известными следящими радиовысотомерами.

3 Предлагаемая методика повышения качества оценок высоты радиовысотомером непрерывного излучения, основанная на выборе типа частотной модуляции зондирующего сигнала и применения фильтра Калмана в измерительном контуре ФАПЧ, позволяет увеличить точность на 20% и быстродействие измерителя в 2 раза.

Соответствие диссертации научной специальности. Диссертация соответствует специальности 2.2.16 – Радиолокация и радионавигация. Полученные в ней результаты соответствуют паспорту специальности по следующим пунктам:

– п. 3 «Разработка и исследование новых методов и принципов радиолокации и радионавигации, позволяющих повысить эффективность радиолокационных и радионавигационных систем»;

– п. 5 «Синтез и анализ алгоритмов обработки сигналов и информации в радиолокационных и радионавигационных системах и устройствах».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и обозначений и списка использованной литературы.

Первая глава посвящена обзору существующих и перспективных РВ непрерывного излучения. В главе приведена классификация алгоритмов обработки радиолокационной информации в современных РВ.

Вторая глава работы посвящена синтезу математических моделей и анализу флуктуационных ошибок РВ непрерывного излучения следящего типа, в том числе математической модели РВ с контуром ФАПЧ, являющегося предметом диссертационного исследования.

Третья глава посвящена сравнительному анализу точности РВ непрерывного излучения с контуром ФАПЧ с точностью следящих РВ других типов в условиях отражения зондирующего сигнала от протяженной шероховатой поверхности и влияния эффекта Доплера.

В четвертой главе представлен поиск параметров зондирующего сигнала, обеспечивающего наилучшую потенциальную точность оценки, а также выбор оптимального петлевого фильтра для контура ФАПЧ.

В пятой главе представлены результаты полунатурного и натурального эксперимента по определению точности РВ непрерывного излучения с контуром ФАПЧ.

Работа содержит 72 рисунка, 5 таблиц. Список использованной литературы включает 134 наименования. Объем работы составляет 19 страницу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель работы, а также задачи исследования. Показана научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Приведены сведения об апробации основных результатов диссертационной работы, её структуре и внедрении результатов. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен аналитический обзор РВ непрерывного излучения и методов обработки СБ. В частности, изучены современные решения и тенденции развития РВ и радиолокационных датчиков непрерывного излучения, выполнен сравнительный анализ их характеристик. Рассмотрены преимущества и недостатки различных методов обработки СБ.

Показано, что развитие данной области техники идет по пути миниатюризации с одновременным переходом на более высокие частоты, что дает возможность размещать приемопередающий узел совместно с блоком антенн на одном кристалле. Нужно отметить, что алгоритмическое обеспечение таких измерителей меняется мало и в целом использует разработки прошлых поколений РВ. Обработка СБ в современных РВ непрерывного излучения основана либо на методах прямого измерения частоты, либо на методах спектрального анализа, которые чувствительны к расширению спектра СБ, вызванному шероховатостью отражающей поверхности и эффектом Доплера.

Для повышения точности РВ в работе предлагается использовать специальный контур ФАПЧ, в котором в качестве опорного использует сигнал с фазовой структурой, повторяющей фазовую структуру ожидаемого СБ. Такой принцип обработки является оптимальным и менее чувствителен к расширению спектра СБ.

В главе доказана актуальность темы диссертационной работы и выбраны необходимые направления исследований.

Во второй главе представлен синтез математических моделей РВ следящего типа. Известны три типа таких устройств: РВ со следящим измерителем частоты СБ; РВ с автоматической подстройкой периода модуляции; предлагаемый в работе РВ с контуром ФАПЧ.

В основу математического моделирования положено следующее представление СБ в случае излучения сигнала с ЧМ типа «симметричная пила»:

$$e_b(t) = \exp[i(\varphi(t - \tau_H) - \varphi(t))] = \exp[i\Phi(t, \tau_H)], \quad (1)$$

где $\varphi(t)$ - фаза излученного сигнала, $\Phi(t, \tau_H)$ - фаза СБ:

$$\Phi(t, \tau_H) = \varphi(t - \tau_H) - \varphi(t) = v \begin{cases} \tau_H (\tau_H - 2t), & \tau_H \leq t < 0,25T_m \\ 2[t - 0,5(0,5T_m + \tau_H)]^2 + 0,5\tau_H (\tau_H - T_m), & 0,25T_m \leq t < 0,25T_m + \tau_H \\ \tau_H (2t - T_m - \tau_H), & 0,25T_m + \tau_H \leq t < 0,75T_m \\ -2[t - 0,5(0,75T_m + \tau_H)]^2 - 0,5\tau_H (\tau_H - T_m), & 0,75T_m \leq t < 0,75T_m + \tau_H \\ -\tau_H (2t - 2T_m - \tau_H), & 0,75T_m + \tau_H \leq t < T_m + \tau_H \end{cases}, \quad (2)$$

где T_m - период модуляции; $\tau_H = 2H/c$ - время задержки; H - высота РВ; $v = 2\Delta\Omega/T_m$ - скорость изменения мгновенной частоты; $\Delta\Omega$ - девиация частоты излучения.

Сигнал (1), фаза которого соответствует уравнению (2), является входным сигналом синтезируемого контура ФАПЧ. Во входном сигнале следует выделить зоны, где наблюдаются переходы мгновенной частоты через нулевой уровень. Эти зоны соответствуют интервалам $[0,25T_m, 0,25T_m + \tau_H]$ и $[0,75T_m, 0,75T_m + \tau_H]$. Ширина этих зон равна времени задержки τ_H , и при условии $\tau_H \ll T_m$, которое обычно выполняется на практике, этими зонами можно пренебречь при генерации ОС $e_r(t) = \exp[i\Phi_0(t, \hat{\tau}_H)]$, фаза которого равна:

$$\Phi_0(t, \hat{\tau}_H) = v \begin{cases} \hat{\tau}_H (\hat{\tau}_H - 2t), & 0 \leq t < 0,25T_m \\ \hat{\tau}_H (2t - T_m - \hat{\tau}_H), & 0,25T_m \leq t < 0,75T_m \\ -\hat{\tau}_H (2t - 2T_m - \hat{\tau}_H), & 0,75T_m \leq t < T_m \end{cases},$$

где $\hat{\tau}_H = 2\hat{H}/c$ - времени задержки, которое соответствует оценке высоты \hat{H} и вычисляется в контуре ФАПЧ так, чтобы свести к нулю усредненную на текущем периоде модуляции разность фаз:

$$\Delta\Phi[n] = \frac{1}{T_m} \int_{(n-1)T_m}^{nT_m} [\Phi(t, \tau_H) - \Phi_0(t, \hat{\tau}_H)] dt. \quad (3)$$

В силу характера изменения $\Phi(t, \tau_H)$ и $\Phi_0(t, \tau_H)$ интеграл в (3) тождественно равен нулю. Поэтому разность $\Delta\Phi(t) = \Phi(t, \tau_H) - \Phi_r(t, \tau_H)$ надо подвергнуть такому преобразованию, чтобы $\Delta\Phi[n]$ была пропорциональна разности времен задержки $(\tau_H - \hat{\tau}_H)$ или соответствующих высот $(H - \hat{H})$. На рисунке 1, а) приведен график зависимостей фаз $\Phi(t, \tau_H)$ и $\Phi_0(t, \tau_H)$ от времени, на рисунке 1, б) приведен график зависимости разности фаз $\Delta\Phi(t)$ от времени на интервале равном периоду модуляции. При расчетах полагалось $H = 150$ м, $\hat{H} = 160$ м, $T_m = 1$ мс. Разность фаз $\Delta\Phi(t)$ носит знакопеременный характер, поэтому для получения нужного результата необходимо выполнить:

ослабленный до нужного уровня излучаемый сигнал $e_{\text{прд}}(t)$. I и Q компоненты сигнала $e_b(t)$ через перестраиваемый фильтр (ПФ) подаются на вычислитель фазы, где формируется сигнал $\Phi(t, \hat{\tau}_H)$, который проходит через специальный фазовый фильтр наименьших квадратов (ФМНК). Оценка фазы СБ $\hat{\Phi}(t, \tau_H)$ с выхода ФМНК поступает в фазовый дискриминатор (ФД). В работе дан синтез ФМНК методом наименьших квадратов с использованием априорной информации о линейном характере изменения фазы СБ на интервалах $[0, 0,25T_m]$, $[0,25T_m, 0,75T_m]$ и $[0,75T_m, T_m]$. Генератор опорного сигнала (ГОС) формирует сигнал $e_r^*(t)$, который подается на второй вычислитель фазы, выходным сигналом которого является $\Phi_0(t, \hat{\tau}_H)$. ФД формирует разность фаз $\Delta\Phi(t) = \hat{\Phi}(t, \tau_H) - \Phi_0(t, \hat{\tau}_H)$. Дискриминационная характеристика ФД равна

$$\Delta\Phi(t) = \text{Arctg}_2(\text{Re}(e_b(t) \cdot e_r^*(t)), \text{Im}(e_b(t) \cdot e_r^*(t))),$$

где $\text{Arctg}_2(x, y)$ – функция арктангенса, продолженная на всю плоскость (x, y) .

Необходимость применения ФМНК для оценки фазы $\hat{\Phi}(t, \tau_H)$ обусловлена тем, что фазовая структура СБ чувствительна к шумам измерений и легко разрушается при малых отношениях сигнал/шум, рисунок 3, а.)

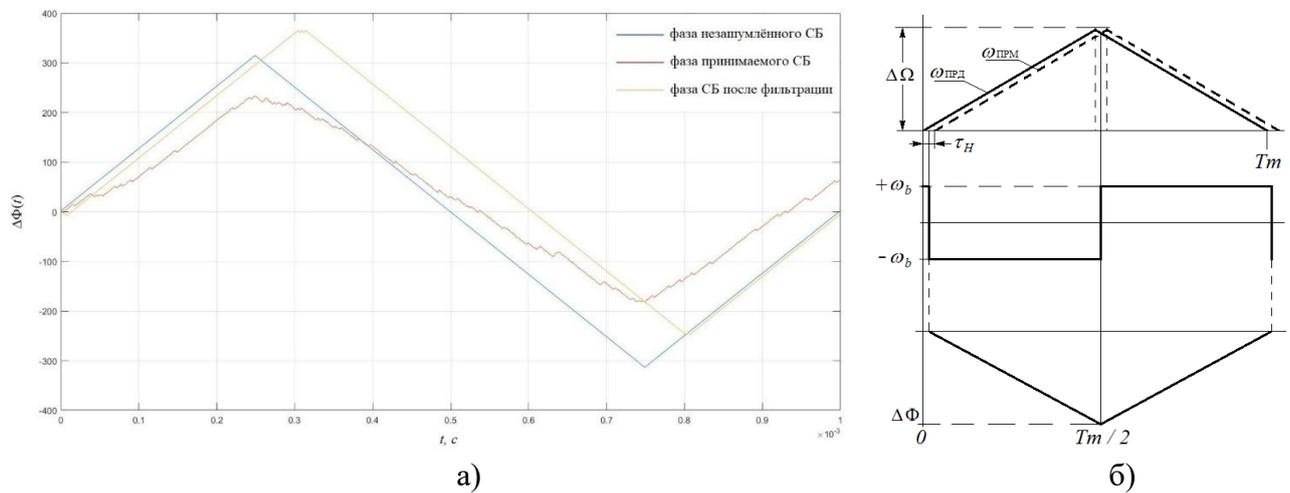


Рисунок 3 – а) фаза СБ при воздействии шумов измерений (ОСШ = 20 дБ); б) эюры сигналов ФМНК.

Разность фаз $\Delta\Phi(t)$ в фазовом преобразователе (ФП) трансформируется в $\Delta\Phi_2(t)$, в соответствии с уравнениями (4) и (5). Из разности фаз $\Delta\Phi_2(t)$ в усредняющем сумматоре $\bar{\Sigma}$ получается дискретный сигнал

$$\Delta\Phi[n] = vT_m(\tau_H - \hat{\tau}_H) = \frac{2vT_m}{c}(H - \hat{H}) = \mu(H - \hat{H}),$$

где n – дискретное время, измеряемое в периодах модуляции, $\mu = 2vT_m/c$ – масштабный коэффициент. Сигнал $\Delta\Phi[n]$, представляющий собой в соответствии с уравнением (6) среднюю разность фаз на периоде модуляции, поступает на вход петлевого сглаживающего фильтра (ПСФ) с коэффициентом передачи $K(z)$, на выходе которого формируется оценка высоты $\hat{H}[n]$.

ПСФ синтезирован методом билинейного преобразования на основе аналогового фильтра-прототипа с коэффициентом передачи

$$K(s) = \frac{k_{\text{ПСФ}}}{s(T_{\text{ПСФ}}s + 1)},$$

где $k_{псф}$ – статический коэффициент усиления контура ФАПЧ, $T_{псф}$ – постоянная времени.

Параметры $k_{псф}$ и $T_{псф}$ определяются путем линеаризации контура ФАПЧ, в результате которой она становится эквивалентной колебательному звену с коэффициентом передачи

$$G(s) = \frac{\Omega_0^2}{s^2 + 2\xi\Omega_0 s + \Omega_0^2},$$

где Ω_0 – граничная частота полосы пропускания и ξ – коэффициент демпфирования. Коэффициент демпфирования может быть вычислен по заданной величине перерегулирования Δ :

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + (\pi/\ln \Delta)^2}}.$$

Задавая Ω_0 и ξ , можно определить параметры $k_{псф}$ и $T_{псф}$:

$$k_{псф} = \frac{\Omega_0}{2\xi}, T_{псф} = \frac{1}{2\xi\Omega_0}.$$

Для уменьшения влияния шумов измерительный контур ФАПЧ охватывается дополнительной обратной связью по частоте, управляющей входным перестраиваемым фильтром ПФ. В качестве ПФ используется цифровой полосовой фильтр. ПФ перестраивается таким образом, чтобы центральная частота его АЧХ была равна оценке частоты СБ $\omega_b[n]$. Оценка $\omega_b[n]$ вычисляется на основе модели измерений по значению оценки высоты $H[n]$. Полоса пропускания фильтра остается постоянной и равной полосе ожидаемого СБ.

На рисунке 4, а) и б) представлены соответственно зависимости абсолютного значения смещения и СКО оценок высоты контуром ФАПЧ от отношения сигнал/шум (ОСШ), полученные в результате моделирования при $H = 75 \text{ м}$, $\Delta F = 200 \text{ МГц}$, $T_m = 1 \text{ мс}$.

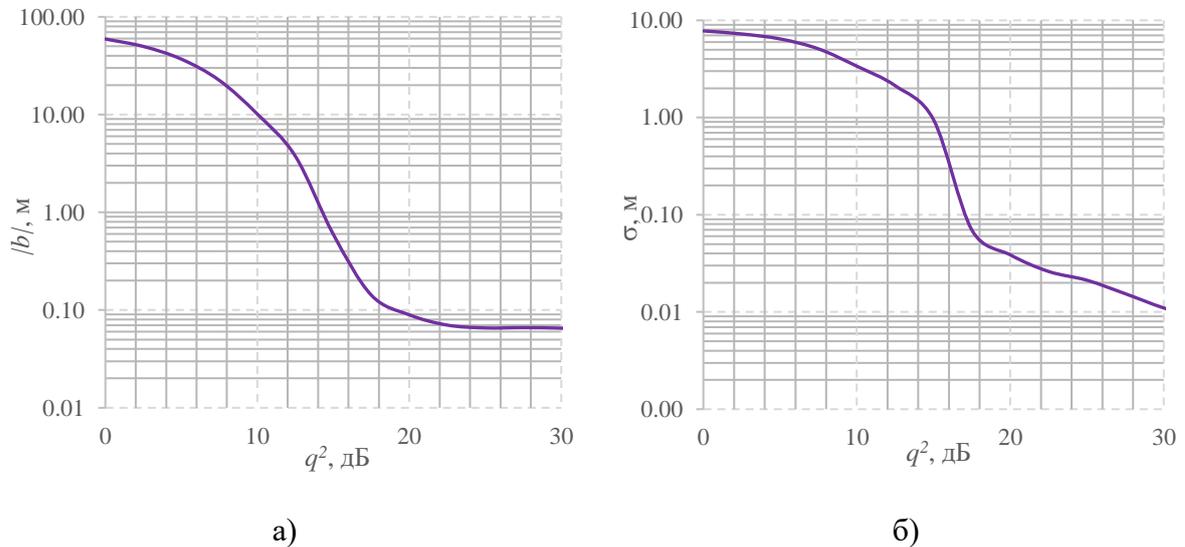


Рисунок 4 – Зависимости абсолютного значения смещения и СКО оценки высоты от ОСШ

Графики показывают, что вне пределов границы аномальных ошибок, которая соответствует ОСШ $q^2 \approx 17 \text{ дБ}$, измеритель дает оценку высоты с общей погрешностью менее $0,25 \text{ м}$.

В третьей главе выполнено исследование точности РВ с контуром ФАПЧ в условиях отражения зондирующего сигнала от протяженной шероховатой поверхности.

Известно, что протяженная шероховатая отражающая поверхность вызывает расширение спектра СБ. Для РВ малых высот это существенно влияет на точность измерений. Поэтому оценка влияния этого фактора является важной задачей. Такое исследование проведено для следующих РВ: РВ со следящим измерителем частоты (СИЧ) и РВ с автоподстройкой периода модуляции

(АПМ), РВ с контуром ФАПЧ, математические модели которых были получены во 2-й главе диссертации.

В проведенном исследовании шероховатая подстилающая поверхность представлена двумя моделями: цилиндрической и трехмерной. Отраженный сигнал от цилиндрической поверхности представлен суперпозицией отражений от точек, равномерно распределенных вдоль поверхности с шагом $\lambda/8$, где λ - длина волны излучаемого сигнала. Решение задачи моделирования с помощью трехмерной модели основано на представлении рассеянного сигнала суммой отражений от стационарных точек случайного рельефа, в которых локально выполняется закон зеркального отражения падающей волны. Благодаря этому при моделировании удается существенно сократить объем вычислений.

Эксперименты, проведенные на этих моделях, показывают близкие результаты. Однако из-за того, что модель шероховатой поверхности со стационарными точками требует меньшего объема вычислений, исследования влияния типа ЧМ на точность РВ с контуром ФАПЧ и эффекта Доплера выполнены на ее основе.

На рисунке 5 а) и б) представлены результаты сравнения точности РВ непрерывного излучения разных типов в зависимости от СКО высот шероховатости p .

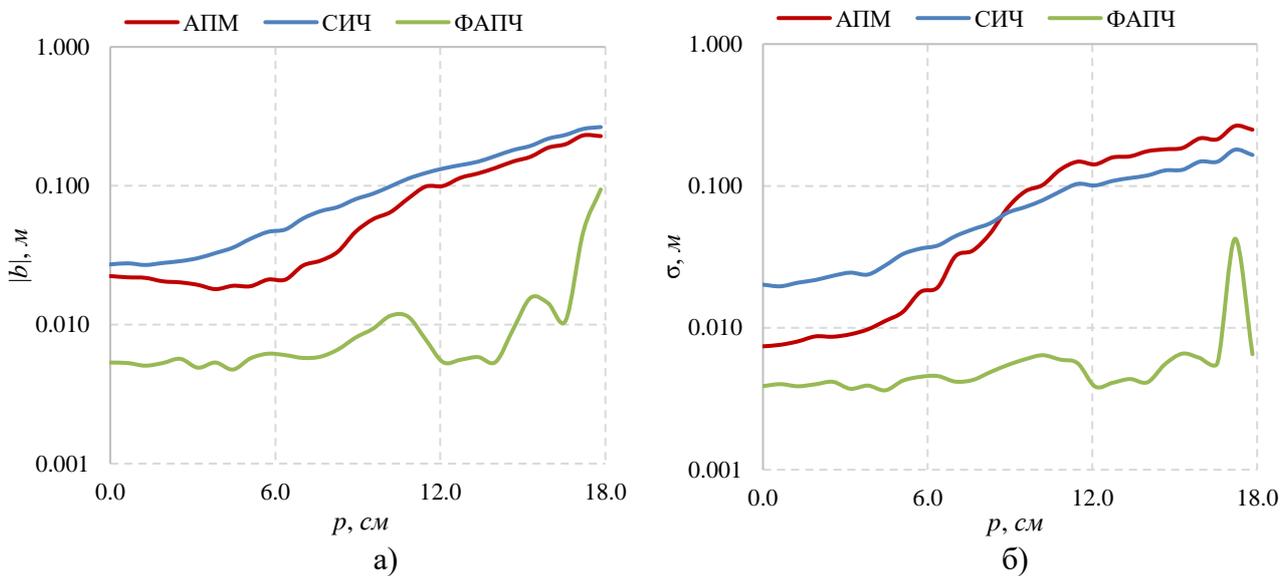


Рисунок 5 – Зависимости абсолютного значения смещения и СКО оценок высоты от СКО шероховатости поверхности.

Графики на рисунке доказывают, что РВ с контуром ФАПЧ обладает значительно меньшей чувствительностью к расширению спектра СБ и имеет в 10 раз более высокую точность, чем РВ с АПМ и РВ с СИЧ по абсолютной величине смещения и СКО. В ходе моделирования установлено, что при больших величинах шероховатости начинают возникать аномальные ошибки, связанные с сильными замиранием полезного сигнала.

Важной задачей является оценка влияния эффекта Доплера на точность РВ. Такое влияние может быть объяснено действием на СБ доплеровского фазового шума, вызывающего дополнительное расширение спектра на величину:

$$\Delta\omega_d = \Delta\theta \frac{4\pi V_0}{\lambda},$$

где V_0 – скорость движения РВ над отражающей поверхностью, $\Delta\theta$ - ширина луча антенны РВ.

Моделирование эффекта доплеровского расширения спектра СБ выполнено путем создания мультипликативной помехи, мгновенная частота которой равна процессу на выходе формирующего фильтра при подаче на его вход белого шума с единичной спектральной

плотностью мощности. Частотная характеристика формирующего фильтра $H_{\phi\phi}(\Delta\omega_d, j\omega)$ выбирается так, чтобы она аппроксимировала диаграмму направленности антенны РВ, а полоса пропускания по уровню половинной мощности составляла $\left(-\frac{\Delta\omega_d}{2}, \frac{\Delta\omega_d}{2}\right)$. Результаты моделирования представлены на рисунке 6.

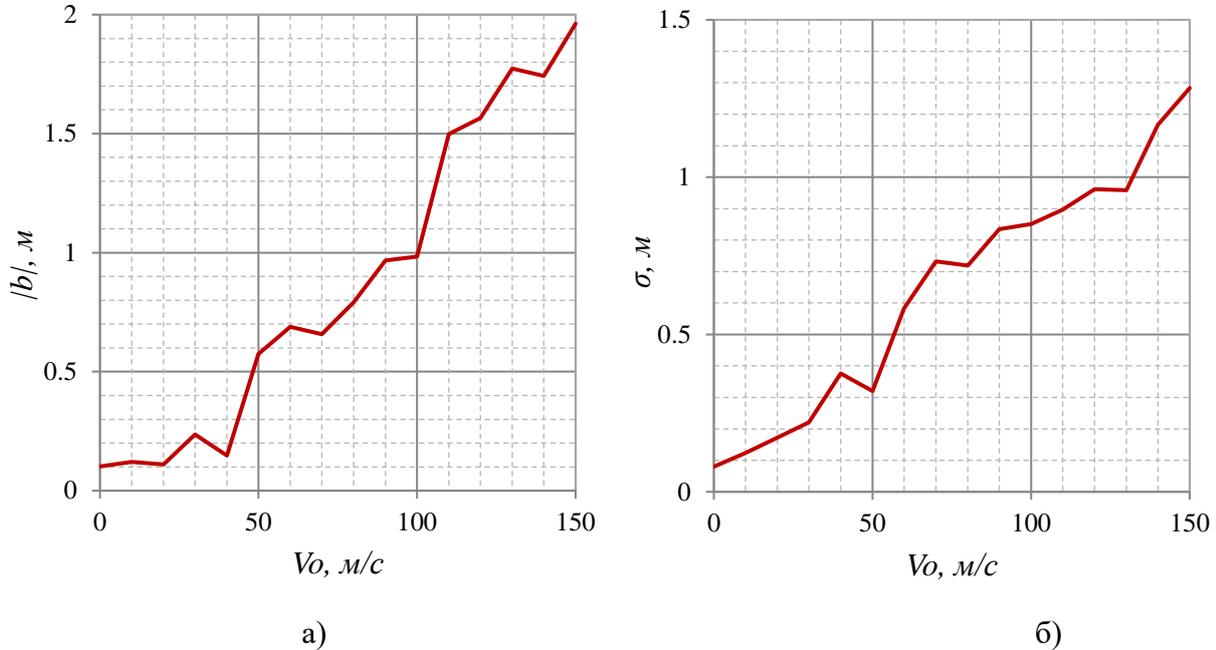


Рисунок 6 – Зависимости абсолютного значения смещение и СКО оценок высоты от скорости движения носителя

Приведенные на рисунке зависимости свидетельствуют о том, что доплеровское расширение спектра СБ при горизонтальном полете носителя не должно вызывать смещения центральной частоты спектра СБ ω_b . При относительно малых скоростях ($V_0 < 50$ м/с), когда $\Delta\omega_d$ составляет менее 1% от величины ω_b погрешность, вызванная эффектом Доплера мала и маскируется погрешностью, вызванной шероховатостью поверхности. Лишь при $V_0 > 70$ м/с влияние доплеровского расширения спектра становится ощутимым. Когда скорость носителя становится равной 100 м/с, смещение оценки высоты и СКО достигают величин порядка 1 м.

В четвертой главе рассмотрены способы улучшения качества измерений РВ с контуром ФАПЧ: а) *выбор типа ЧМ*; б) *оптимизация петлевого сглаживающего фильтра*.

В радиолокации непрерывного излучения для модуляции зондирующего сигнала используются следующие типы ЧМ: симметричная линейная ЧМ (СЛЧМ), несимметричная линейная ЧМ (НСЛЧМ) и гармоническая ЧМ (ГЧМ). ГЧМ представляет наибольший интерес, так как СБ имеет в этом случае более широкий спектр, чем при линейных законах ЧМ. Поэтому использование ГЧМ должно повысить точность оценки высоты.

В рамках проведенных исследований получены нижние границы Крамера-Рао для СКО оценок высоты при использовании перечисленных типов ЧМ:

$$\sigma_{СЛЧМ} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{c}{q\Delta\Omega}, \quad \sigma_{НСЛЧМ} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{c}{q\Delta\Omega}, \quad \sigma_{ГЧМ} = \frac{c}{q\Delta\Omega},$$

где q^2 – ОСШ; c – скорость света; $\Delta\Omega$ – девиация частоты.

Из полученных выражений следует, что использование ГЧМ обеспечивает на 22 % лучшую потенциальную точность по сравнению с другими типами ЧМ при работе РВ по плоской

поверхности. Такой же вывод можно сделать и из анализа зависимостей смещения и СКО оценок высоты от СКО высот шероховатости, полученных в результате математического моделирования и представленных на рисунке 7 а), б).

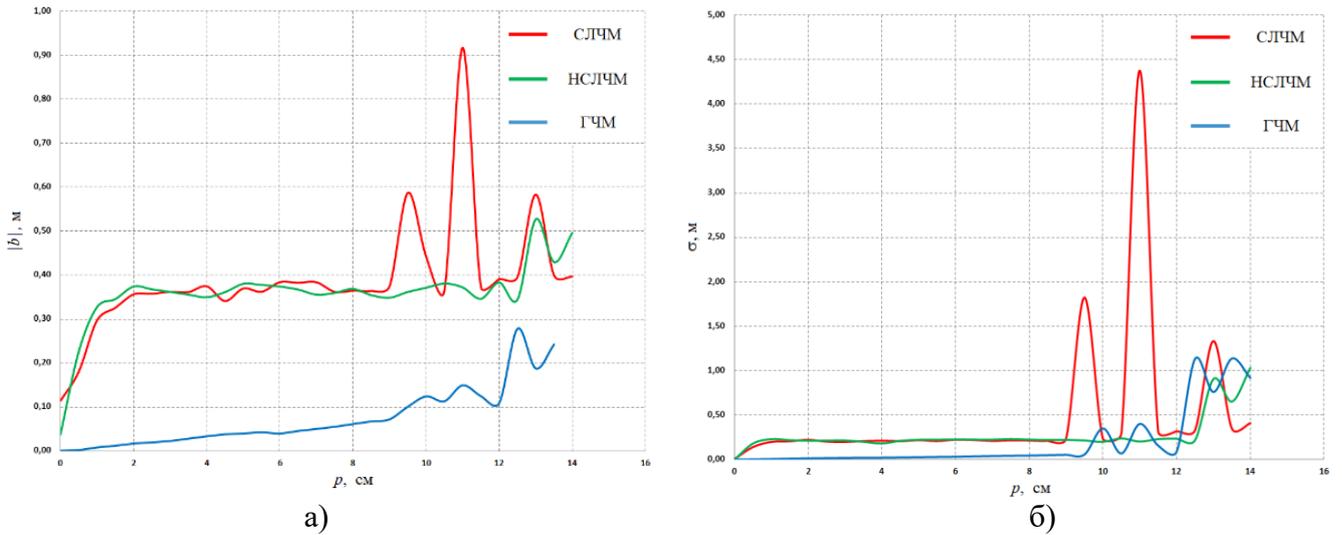


Рисунок 7 – Зависимость:
а) абсолютного значения смещения оценок; б) СКО оценок
от СКО шероховатости поверхности

На интервале изменения СКО высот шероховатости от 0 до 2λ абсолютная величина смещения оценки при ГЧМ более чем в 3 раза меньше по сравнению со смещением при СЛЧМ и НСЛЧМ, а величина СКО оценок при ГЧМ на заданном интервале шероховатости в среднем в 4 раза меньше.

Динамические и точностные свойства измерительного контура ФАПЧ зависят от характеристик петлевого сглаживающего фильтра (ПСФ). В данной работе рассмотрены несколько типов линейных фильтров, которые могут быть использованы в качестве ПСФ: стационарные фильтры с астатизмом первого и второго порядка, фильтр Калмана.

Уравнения фильтра Калмана для контура ФАПЧ имеют следующий вид:

$$x_{n|n-1} = A x_{n-1|n-1},$$

$$x_{n|n} = x_{n|n-1} + K_n (y_n - U x_{n|n-1}),$$

$$P_{n|n-1} = A P_{n-1|n-1} A^T + Q,$$

$$K_n = P_{n|n-1} U^T (U P_{n|n-1} U^T + R)^{-1},$$

$$P_{n|n} = P_{n|n-1} - K_n U P_{n|n-1},$$

$$x_{n|n} = \begin{pmatrix} H_n \\ \dot{H}_n \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 1 & T_m \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad Q = \begin{pmatrix} T_m^2/3 & T_m/2 \\ T_m/2 & 1 \end{pmatrix} \sigma_a^2 + \begin{pmatrix} p^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad R = \left(\frac{c}{4\pi \Delta F} \right)^2 \frac{1}{q^2}$$

где $x_{n|n}$ – вектор состояния; H_n, \dot{H}_n – оценки текущей высоты и вертикальной скорости РВ; $x_{n|n-1}$ – экстраполированный вектор состояния; y_n – измерение высоты; A – матрица перехода; $U = [1 \ 0]$ – матрица наблюдений; K_n – матрица коэффициентов усиления фильтра; $P_{n|n}, P_{n|n-1}$ – корреляционная и экстраполированная матрицы ошибок оценки; Q, R – корреляционные матрицы формирующего шума и шума наблюдений; p^2 – дисперсия высот шероховатости поверхности, σ_a^2 – дисперсии вертикального ускорения носителя РВ, вызванные влиянием условий полета РВ. При записи корреляционной матрицы формирующего шума Q использована модель движения с ускорением типа белый шум.

Качество оценок высоты контуром ФАПЧ исследовано по величине динамической и флуктуационной ошибок. Для получения количественных оценок динамических свойств

измерительного контура ФАПЧ, проведено математическое моделирование полета РВ над поверхностью, высота до которой изменялась по гармоническому закону:

$$H(t) = H_0 + A_s \cdot \cos\left[\frac{2\pi V_0 t}{P_s}\right],$$

где A_s и P_s – амплитуда и период шероховатостей поверхности; V_0 – скорость носителя; H_0 – средняя высота. Переходные процессы в контуре ФАПЧ с разными типами ПСФ представлена на рисунке 8.

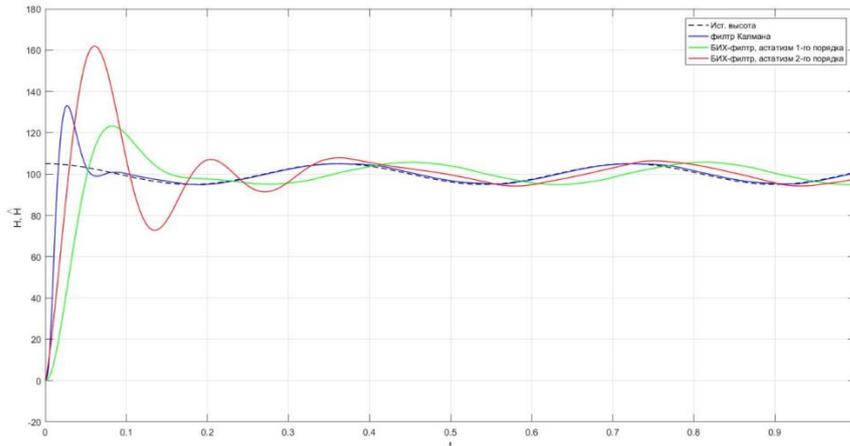


Рисунок 8 – Оценка высоты РВ при полете над гармонической шероховатой поверхностью

В ходе моделирования установлено, что величина динамической ошибки в контуре ФАПЧ для данного случая имеет следующие значения:

- $\delta_{\text{дин}} = 2,67 \text{ м}$, $\tau_{\text{дин}} = 0,023 \text{ с}$ для фильтра с астатизмом 1-го порядка;
- $\delta_{\text{дин}} = 1,39 \text{ м}$, $\tau_{\text{дин}} = 0,010 \text{ с}$ для фильтра с астатизмом 2-го порядка;
- $\delta_{\text{дин}} = 0,86 \text{ м}$, $\tau_{\text{дин}} = 0,005 \text{ с}$ для фильтра Калмана.

Зависимости абсолютного значения смещения и СКО флуктуационной ошибки оценки высоты от ОСШ q^2 при приёме сигнала на фоне внутренних шумов представлены на рисунке 9 а), б).

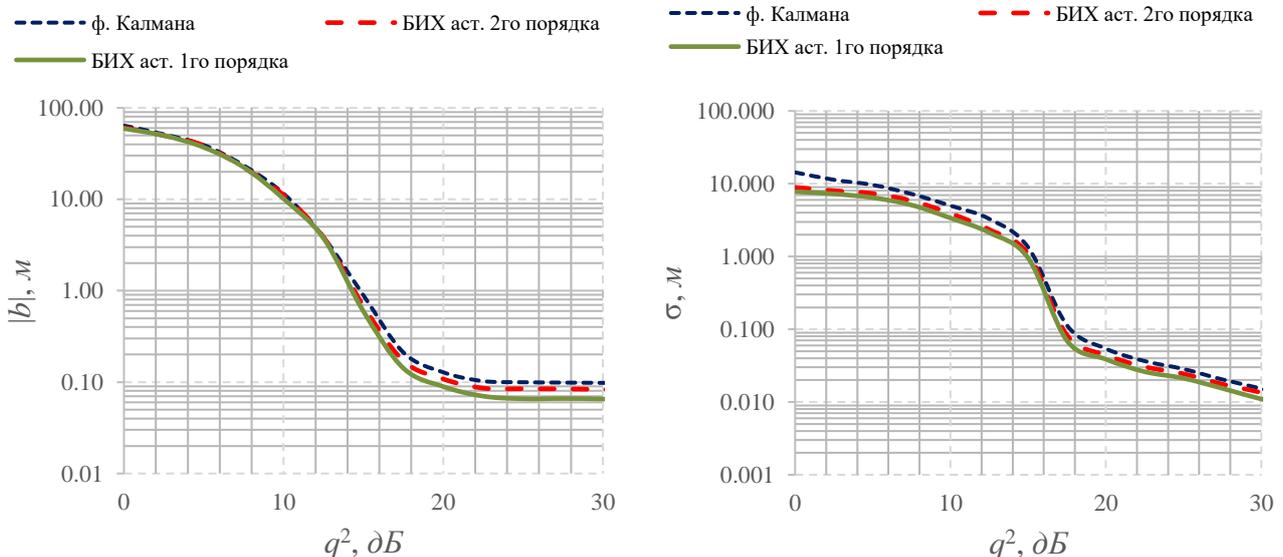


Рисунок 9 – Зависимости абсолютного значения смещения и СКО оценки от ОСШ

Анализ флуктуационных ошибок в контуре ФАПЧ показал, что при $q^2 \geq 20$ дБ смещение и СКО оценок высоты при использовании рассмотренных в работе ПСФ имеют порядок нескольких сантиметров. Поэтому наиболее существенной для рассматриваемой измерительной системы представляется величина вносимой ПСФ динамической ошибки. По этому параметру использование ПСФ Калмана обеспечивает более чем двухкратное уменьшение ошибок и двухкратное увеличение быстродействия измерителя.

В пятой главе рассмотрена экспериментальная оценка точности РВ с контуром ФАПЧ. Данное исследование проведено в два этапа: этап полунатурных лабораторных тестов и этап натурных испытаний макетного образца.

На первом этапе выполнены полунатурные испытания РВ с контуром ФАПЧ в лабораторных условиях. Для этого построен макет приемопередающей части РВ и организован испытательный стенд, имитирующий необходимые условия работы измерителя.

Стенд, рисунок 10 а), состоит из передатчика, функцию которого выполнял векторный генератор R&S SMW200A; квадратурного СВЧ приемника; цифрового осциллографа R&S RTM3004 для оцифровки и записи полученного СБ; направленного ответвителя (НО). В качестве устройства обработки сигналов использовался персональный компьютер (ПК) с установленной системой Matlab, где производилась обработка записанного СБ. В качестве имитатора канала распространения сигнала РВ использованы три линии задержки (ЛЗ), выполненные на коаксиальном кабеле РК50-4-22. Затухание и групповое время задержки ЛЗ предварительно измерены векторным анализатором цепей R&S ZNB20.

Цель данного исследования - проверка точности РВ с контуром ФАПЧ и сравнение с полученными ранее данными. Результаты этого исследования представлены на рисунке 10 б) в виде зависимостей СКО оценок от ОСШ при разных типах ЧМ.

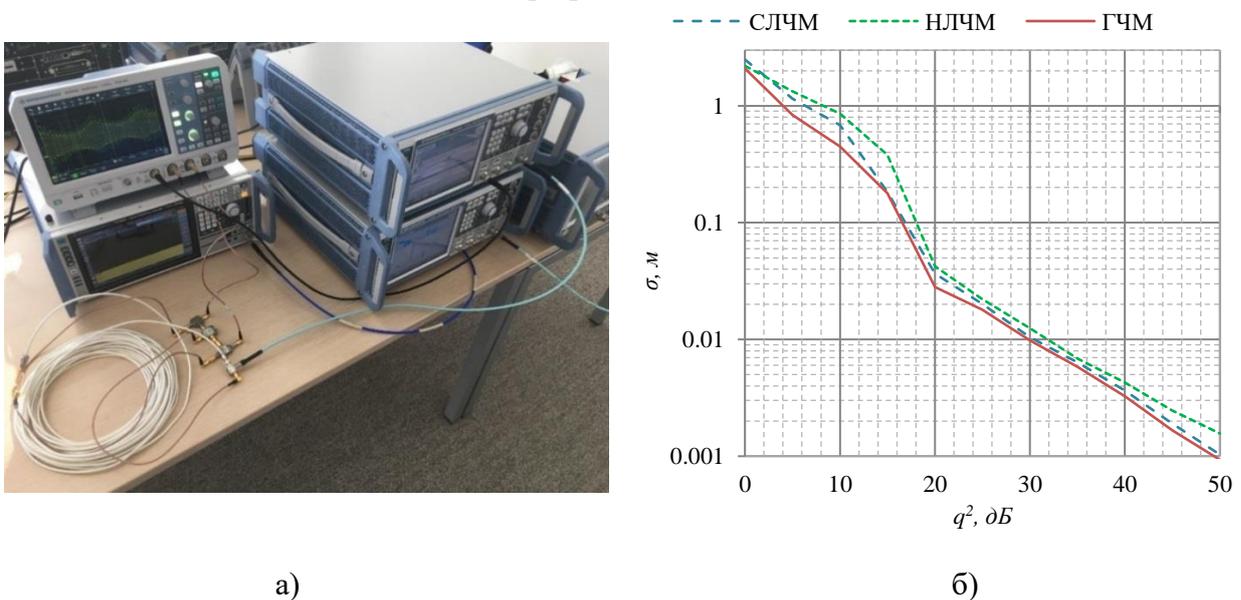


Рисунок 10 – Полунатурные испытания:
а) стенд РВ; б) зависимость СКО оценок от величины ОСШ при разных видах модуляции

Графики на рисунке 10 б) показывают, что применение ГЧМ обеспечивает в среднем на 20% лучшую точность в сравнении с СЛЧМ, и на 30% - в сравнении с НСЛЧМ, что подтверждает теоретические выводы.

На втором этапе экспериментальных исследований проведены испытания макетного образца РВ с измерительным контуром ФАПЧ в условиях отражения зондирующего сигнала от протяженной шероховатой поверхности, в качестве которой использован фасад высотного здания, рисунок 11.



Рисунок 11 – Натурные испытания макетного образца РВ с контуром ФАПЧ

Макетный образец радиовысотомера и вся необходимая аппаратура размещены в многоэтажном здании на балконе на высоте 30 м над поверхностью для исключения переотражений от земли. Источником отраженного сигнала было противоположное здание, стоящее параллельно дому, где размещалась аппаратура РВ. Оцениваемая во время эксперимента дальность, имитирующая высоту полета, была предварительно определена с помощью лазерного дальномера BOSCH GLM 150, как минимальное расстояние от точки наблюдения до фасада противоположного дома и составила $88,465 \pm 0,006$ м. Среднее значение оценки дальности в эксперименте составило 90,98 м при использовании СЛЧМ и 90,37 м при использовании ГЧМ. По измеренной заранее лазерным дальномером дальности до цели, получены значения смещения и СКО оценки: $b_{ГЧМ} = 1,90$ м, $\sigma_{ГЧМ} = 2,44$ м; $b_{СЛЧМ} = 2,51$ м, $\sigma_{СЛЧМ} = 2,70$ м.

Результаты эксперимента показали, что РВ с контуром ФАПЧ обеспечивает точную оценку высоты в условиях отражения радиосигнала от протяженной шероховатой поверхности, в качестве которой использовался фасад противоположного здания. Использование в макетном образце РВ зондирующего сигнала с ГЧМ имеет на 24% меньшую величину смещения оценки и на 10% меньшее СКО по сравнению с СЛЧМ. Это подтверждает справедливость полученных в ходе предшествующих исследований выводов об эффективности работы контура ФАПЧ по протяженной шероховатой поверхности и преимуществах ГЧМ.

В общих выводах и заключении приведены следующие основные результаты работы.

1. Выполненный в первой главе обзор существующих методов обработки сигналов, используемых в РВ непрерывного излучения, охватывает широкий спектр, начиная от простейших измерителей первых поколений до современных концептуальных подходов, основанных на методах искусственного интеллекта и нейросетевой обработки.

2. В соответствии с поставленной задачей и на основании проведенного анализа существующих радиовысотомеров непрерывного излучения предложен оригинальный метод обработки СБ, в основе которого лежит использование контура фазовой автоподстройки опорного сигнала. Показано, что такой измеритель позволяет получить оптимальные по критерию максимального правдоподобия оценки высоты.

3. Введение в измерительный контур дополнительного узкополосного перестраиваемого по частоте фильтра и фазового фильтра наименьших квадратов позволяет увеличить точность РВ при приеме сигналов на фоне шумов. При ОСШ 30 дБ смещение оценки в РВ с контуром ФАПЧ снизилось в 10 раз, достигнув величины 0,07 м, а СКО снизилось на два порядка, достигнув величины 0,01 м.

4. Исследование точности РВ непрерывного излучения в условиях отражения радиосигнала от шероховатой поверхности позволило с высокой степенью достоверности установить, что РВ с измерительным контуром ФАПЧ обладает меньшей чувствительностью к

эффекту расширения спектра биений в сравнении с РВ других типов. Измерительный контур ФАПЧ показывает на 50% более высокую точность.

5. Влияние доплеровского расширения спектра СБ при горизонтальном полете становится заметным при скорости движения носителя, превышающей 70 м/с, что для большинства маломоторных летательных аппаратов близко к предельно достижимой скорости.

6. Показано, что использование гармонического типа частотной модуляции в РВ непрерывного излучения обеспечивает более высокую точность в сравнении с линейными типами. Гармоническая частотная модуляция позволяет более чем на 20% снизить флуктуационную ошибку, а при оценке высоты над протяженной шероховатой поверхностью - более чем в 3 раза повысить точность в интервале СКО высот шероховатости от 0 до 2λ .

7. Анализ динамических свойств контура ФАПЧ показал, что наилучшим решением для реализации петлевого сглаживающего фильтра является фильтр Калмана. В сравнении с линейными стационарными фильтрами первого и второго порядков астатизма петлевой сглаживающий фильтр Калмана позволяет в 3 раза сократить время переходного процесса, и в среднем 2 раза уменьшить динамическое запаздывание и динамической ошибку в РВ с контуром ФАПЧ.

8. Полунатурный эксперимент, проведенный на лабораторном стенде, который имитирует отражение радиосигнала от плоской поверхности, показал, что на границе эффективной работы измерительного контура ФАПЧ, соответствующей ОСШ 17 дБ, ошибка оценки не превышает 2% от оцениваемой высоты. При величине ОСШ 20 дБ использование гармонической частотной модуляции позволило получить смещение оценок менее 0,05 м и СКО менее 0,03 м.

9. Натурные испытания, позволяющие оценить точность измерения высоты относительно протяженной шероховатой поверхности показали, что предлагаемый измеритель может успешно применяться для определения высоты относительно реальной подстилающей поверхности, а использование гармонического закона частотной модуляции позволяет повысить точность на 24% по смещению оценок и на 10% по СКО ошибок.

Полученные в ходе исследований теоретические результаты, результаты расчетов, разработанные алгоритмы и методики, а также макетные образцы использованы на предприятии ООО «Контур-НИИРС» в рамках НИР по теме «Контур-РВ»

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в изданиях из Перечня ВАК

1. Тарасенков, А.А. Следящий радиовысотомер малых высот с системой ФАПЧ / А.А. Монаков, А.А. Тарасенков // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2022. – Т.25. – №2. – С. 54-63.

2. Тарасенков, А.А. Сравнительный анализ математических моделей следящих радиовысотомеров / А.А. Монаков, А.А. Тарасенков // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2022. – Т.25. – №4. – С. 72-80.

3. Тарасенков, А.А. Точность следящих высотомеров при работе по двухмерной шероховатой поверхности / А.А. Монаков, А.А. Тарасенков // Радиотехника. – 2023. – Т. 87. – №6. – С. 83 – 90.

4. Тарасенков, А.А. Влияние типа частотной модуляции на точность радиодальномера непрерывного излучения / А.А. Тарасенков // Вопросы радиоэлектроники. Серия Техника телевидения. – 2024. – Вып. 1. С 52 – 59.

5. Тарасенков, А.А. Сравнительные натурные испытания следящий радиодальномеров непрерывного излучения / А.А. Тарасенков // Вопросы радиоэлектроники. Серия Техника телевидения. – 2024. – Вып. 1. – С. 60 – 68.

Патенты

6. Патент на полезную модель №207967 Российская Федерация, U1 G01S 13/34, H04L 25/03. Радиовысотомер с непрерывным излучением и фазовой автоподстройкой опорного сигнала: № 2021122588 : заявлен 29.07.2021 : опубликован 29.11.2021 / А. А. Монаков, А. А. Тарасенков. – 8 с.

Работы, опубликованные в изданиях РИНЦ

7. Тарасенков, А.А. ЧМ-радиодальномер с дискретным следящим контуром / А.А. Тарасенков // Датчики и Системы. – 2019. – №2. – С. 40-44.

8. Тарасенков, А.А. Экспериментальная оценка точности радиовысотомера малых высот с контуром ФАПЧ / А.А. Тарасенков // Датчики и Системы. – 2023. – №2. – С. 29-35.

Материалы конференций, индексируемых SCOPUS

9. Tarasenkov, A.A. A low-level radar altimeter with phase locked loop estimator / А.А. Tarasenkov, А.А. Monakov // Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems. – 2022. – Т. 5. – № 1. – С. 472-475.

Материалы конференций, индексируемых в РИНЦ

10. Тарасенков, А.А. Экспериментальная оценка точности радиовысотомера с дискретным следящим контуром. / А. А. Тарасенков // Научная сессия ГУАП: сборник докладов, г. Санкт-Петербург, 9-13 апреля 2018 г. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2018. – Ч.1. Технические науки. – С. 169 – 174.

11. Тарасенков, А.А. Радиоволновый датчик для охранных систем / А.А. Тарасенков, М.С. Барилко // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: сборник докладов Второй международной научной конференции, г. Санкт-Петербург, 14-22 апреля 2021 г. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2021. – С. 5 – 8.

12. Тарасенков, А.А. Выбор закона частотной модуляции радиовысотомера малых высот с контуром ФАПЧ / А.А. Тарасенков, А.А. Монаков // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: сборник докладов Второй международной научной конференции, г. Санкт-Петербург, 14-22 апреля 2021 г. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2021. – С. 39 – 42.

13. Тарасенков, А.А. Дальномер с непрерывным ЛЧМ сигналом и контуром ФАПЧ в качестве измерителя / А.А. Монаков, А.А. Тарасенков // «Радиолокация, навигация, связь»: сборник трудов XXVII Международной научно-технической конференции, г. Воронеж, 29-30 сентября 2021 г., RLNC 2021. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2021. – С. 226-235.

14. Тарасенков, А.А. Следящий радиовысотомер с петлей фазовой автоматической подстройки частоты в качестве измерителя / А.А. Монаков, А.А. Тарасенков // «Радиовысотометрия-2021»: Сборник трудов Шестой Всероссийской научно-технической конференции, г. Каменск-Уральский, 19-22 октября 2021 г. – Екатеринбург : ООО «Типография ФортДиалог», 2021. – С. 42 – 47.

15. Тарасенков А.А. Сравнительный анализ точности следящих радиовысотомеров / А.А. Монаков, А.А. Тарасенков // «Радиолокация, навигация, связь»: сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции, г. Воронеж, 19-21 апреля 2023 г., RLNC 2022. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2022. – С. 258-265.

16. Тарасенков, А.А. Исследование влияния сглаживающих фильтров на точность радиовысотомера с контуром ФАПЧ / А.А. Монаков, А.А. Тарасенков // «Радиолокация, навигация, связь»: сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции, г. Воронеж, 18-20 апреля 2023 г., RLNC 2023. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2023. – С. 248-254.

17. Тарасенков, А.А. Сглаживающие фильтры в измерительном контуре ФАПЧ радиовысотомера малых высот / А. А. Тарасенков, А. А. Монаков // Волновая электроника и

инфокоммуникационные системы: сборник материалов XXVI Международной научной конференции, г. Санкт-Петербург, 20 мая – 02 июня 2023 г. : в 3-х частях. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2023. – С. 261-268.

18. Тарасенков, А.А. Исследование влияния закона частотной модуляции на потенциальную точность радиовысотомера непрерывного излучения / А. А. Тарасенков, А. А. Монаков // «Радиолокация, навигация, связь»: сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции, г. Воронеж, 16-18 апреля 2024 г., RLNC 2024. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2024. – Том 2. – С. 421-428.