

На правах рукописи



Кишко Дмитрий Владимирович

**Повышение точности определения навигационных параметров вертолета  
при посадке на корабль**

Специальность: 05.12.14 – «Радиолокация и радионавигация»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва - 2016

Работа выполнена на кафедре 402 «Радиосистемы и комплексы управления, передачи информации и информационная безопасность» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Фомин Анатолий Иванович**  
кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры 402  
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: **Бетанов Владимир Вадимович**  
доктор технических наук, член-корреспондент РАН,  
профессор, начальник центра АО «Российские космические  
системы»

**Шатилов Александр Юрьевич**  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Радиотехнические системы» ФГБОУ ВО «Национальный  
исследовательский университет «МЭИ»

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Центральный научно-исследовательский институт  
машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш)

Защита диссертации состоится 19 апреля 2016 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по адресу 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета) и на сайте [http://www.mai.ru/events/defence/?ELEMENT\\_ID=63989](http://www.mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=63989).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.125.03  
доктор технических наук



Сычев М.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

Для захода и посадки вертолета на палубу корабля используются различные системы, которые обеспечивают летчика достоверной и непрерывной навигационной информацией о пространственном положении вертолета относительно корабля. Повышение точности определения навигационных параметров (координат, скоростей, ориентации вертолета относительно корабля) позволяет выполнять заход и посадку вертолета в автоматизированном режиме даже в сложной гидрометеорологической обстановке. В настоящее время наиболее распространенный способ обеспечения автоматизированной посадки основан на использовании навигационных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), установленных на корабле и летательном аппарате и работающих в дифференциальном режиме. Следует отметить, что радиолинии передачи информации космическими аппаратами (КА) в навигационные приемники (НП) потребителей ГНСС обладают низкой помехоустойчивостью при воздействии организованных помех. Этот недостаток объясняется малым отношением сигнал/шум на входе НП ввиду большой дальности между КА и НП и является существенным препятствием при использовании ГНСС не только в военных, но и в гражданских авиационных посадочных комплексах. В связи с этим интенсивно развиваются альтернативные подходы к обеспечению безопасной автоматизированной посадки.

Одним из перспективных направлений для обеспечения автоматизированной посадки вертолета на палубу корабля является использование локальных радионавигационных систем (ЛРНС), обладающих большей энергетикой по сравнению с ГНСС и позволяющих обеспечить помехозащиту и автономность работы радиосистемы в условиях воздействия помех. В ГНСС высокая точность определения навигационных параметров достигается за счет использования информационной избыточности измерений и обеспечения низкого коэффициента геометрии  $K_r$ , который связывает дисперсию ошибки измерений с дисперсией определения навигационных параметров вертолета. Коэффициент геометрии в ГНСС зависит от взаимного положения НП и КА, измерения которых участвуют в процессе обработки. В первом приближении можно полагать, что расстояние между соседними КА сопоставимо с расстоянием между КА и НП и в типовой ситуации коэффициент геометрии равен  $K_{r, ГНСС} \approx 2$ . В ЛРНС при ограниченных размерах площади размещения передающих устройств на палубе корабля расстояние между передающими устройствами значительно меньше расстояния до вертолета, заходящего на посадку, вследствие чего коэффициент геометрии значительно больше, чем в ГНСС  $K_{r, ЛРНС} \gg K_{r, ГНСС}$ , что приводит к значительному увеличению погрешности определения навигационных параметров вертолета при его удалении от корабля. Разработка методов, обеспечивающих

повышение точности определения навигационных параметров вертолета при заданных ограничениях, является актуальной задачей.

ЛРНС могут быть использованы при развертывании мобильных автономных систем автоматизированной посадки беспилотных летательных аппаратов, данная проблематика особенно актуальна в настоящее время в связи с высокими темпами развития беспилотной авиации.

Основные усилия в области исследования и разработки ЛРНС касаются в основном наземных вариантов их исполнения. При этом имеются достаточно существенные различия морских и наземных ЛРНС, что требует их отдельного исследования. Так, например, в морском варианте исполнения необходимо учитывать качку корабля при заходе и посадке вертолета.

Принципы функционирования, основные параметры и тактико-технические характеристики существующих коммерческих систем автоматизированной посадки вертолета на палубу корабля, например, таких как DeckFinder, в известной автору литературе раскрываются неполно.

#### **Объект и предмет диссертационного исследования**

Объектом исследования является локальная радионавигационная корабельная система посадки вертолета.

Предметом исследования являются методы повышения точности определения навигационных параметров (координат и скоростей) вертолета морской авиации при выполнении захода и посадки на палубу в автоматизированном режиме с использованием корабельной локальной радионавигационной системы.

#### **Цель и задачи работы**

Целью диссертационной работы является повышение точности определения навигационных параметров вертолета при посадке на корабль в результате разработки и исследования алгоритмов вторичной обработки сигналов ЛРНС. В диссертационной работе в соответствии с поставленной целью были решены следующие задачи:

- 1) Обоснована структура ЛРНС, обеспечивающих автоматизированную посадку вертолета на палубу корабля.
- 2) Проведен сравнительный анализ помехозащиты аппаратуры ГНСС и ЛРНС.
- 3) Разработаны методы синхронизации передающих устройств корабельных радионавигационных модулей ЛРНС, обеспечивающие их совместное когерентное излучение без применения процедур калибровки приемо-передающих трактов в процессе работы системы.
- 4) Показано, что при ограниченном количестве корабельных радионавигационных модулей порядка 4-8 и большом коэффициенте геометрии, реализуемом, как правило, в системах с

малыми базами, известные алгоритмы вторичной обработки измерений псевдодальности, псевдодоплера и псевдофазы, основанные на рекуррентных алгоритмах оценивания, являются при определенных условиях расходящимися, либо формируют оценки параметров с погрешностью, неудовлетворяющей требованиям автоматизированной посадки.

- 5) Разработан алгоритм многомодальной фильтрации, позволяющий увеличить точность определения навигационных параметров за счет обработки псевдофазовых измерений и применения процедуры разрешения целочисленной неоднозначности.
- 6) Проведен сравнительный анализ разработанного алгоритма с алгоритмами вторичной обработки, применяемыми на практике.
- 7) Разработана с использованием среды Matlab модель алгоритмов вторичной обработки сигналов, выполнена оценка точности и сходимости алгоритмов.
- 8) Решена задача параметрической оптимизации размещения антенн корабельных навигационных модулей ЛРНС на палубе с учетом ограничений на возможные положения вертолета и конструктивные особенности корабля.
- 9) Проведен анализ влияния смещения фазовых центров антенн корабельных навигационных модулей на погрешность определения координат вертолета и приведены рекомендации для уменьшения данного влияния.

#### **Научная новизна работы**

- 1) Разработаны методы синхронизации радионавигационных модулей ЛРНС, позволяющие обеспечить когерентность излучения передающих устройств модулей со среднеквадратической погрешностью не хуже 0,6 рад, что соответствует задержке по времени фазы несущего колебания равной 10 пс при несущей частоте  $f_0=10\text{ГГц}$ . Предложенный подход обеспечивает синхронизацию по полезному сигналу в фоновом режиме при одновременном выполнении целевой функции системы и не требует применения дополнительных процедур калибровки, использования дополнительной аппаратуры и имеет погрешность сравнимую с погрешностью дорогостоящих процедур синхронизации.
- 2) Разработан алгоритм многомодальной фильтрации на основе адаптации теории линейного рекуррентного оценивания на класс нелинейных задач с применением процедуры разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений. Анализ показал, что предлагаемый алгоритм позволяет снизить вероятность появления аномальной ошибки разрешения целочисленной неоднозначности в 20 раз, что позволяет уменьшить среднеквадратическую погрешность определения координат вертолета в 10 и более раз по сравнению с линейным подходом.

- 3) Разработана имитационная модель определения навигационных параметров вертолета с использованием измерений параметров радиосигналов локальной радионавигационной корабельной системы посадки, позволившая провести сравнительный анализ разработанного алгоритма с известными аналогами, решить задачу параметрической оптимизации размещения навигационных модулей на корабле и определить допустимые смещения фазовых центров антенн навигационных модулей.

#### **Практическая и теоретическая значимость работы**

- 1) Рассмотренные принципы построения и функционирования локальных радионавигационных корабельных систем посадки вертолета на палубу могут быть использованы при проектировании радионавигационных систем автоматизированного захода и посадки пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов на вертолетные площадки морских буровых платформ, стационарные аэродромы и наземные неподготовленные площадки.
- 2) Разработанные методы синхронизации могут применяться в многопозиционных радиолокационных системах с малыми базами для обеспечения когерентного излучения пространственно-распределенных передающих устройств;
- 3) На основе теории линейного рекуррентного оценивания с использованием неоднозначных псевдофазовых измерений разработана ранее не встречающаяся в теории модификация алгоритма многомодальной фильтрации, позволяющая снизить вероятность появления аномальной ошибки в 20 раз по сравнению с линейным алгоритмом.
- 4) Разработанный алгоритм многомодальной фильтрации может применяться при обработке фазовых измерений в наземных и авиационных когерентно-импульсных радиолокационных станциях, многобазовых пеленгаторах и при определении навигационных параметров объекта по сигналам ГНСС.
- 5) Результаты анализа влияния смещений фазовых центров антенн радионавигационных модулей корабельного сегмента и параметрической оптимизации размещения модулей на корабле могут быть использованы на этапах проектирования и развертывания корабельных ЛРНС.

#### **Методы исследования**

В диссертационном исследовании были использованы методы теории вероятности и математической статистики, математического анализа, линейной алгебры и аналитической геометрии, статистической теории радиотехнических систем, теории оптимальной фильтрации случайных процессов, программирования. В процессе исследования применялось компьютерное моделирование, учитывались рекомендации и нормативные документы ИКАО и МСЭ, а также материалы периодической печати.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

- 1) Принципы построения и функционирования корабельных локальных радионавигационных систем, которые в отличие от действующих спутниковых радионавигационных систем позволяют в условиях воздействия организованных помех определять навигационные параметры вертолета с погрешностью, требуемой для автоматизированной посадки на палубу корабля, за счет повышения энергетики радиосистемы, обеспечения когерентности излучаемых сигналов и применения фильтрационных алгоритмов обработки псевдофазовых измерений с разрешением целочисленной неоднозначности.
- 2) Методы синхронизации пространственно-разнесенных модулей корабельного сегмента, не требующие проведения калибровки приемо-передающих трактов модулей и обеспечивающие когерентное излучение со среднеквадратической погрешностью не хуже 0,6 рад в процессе работы системы по целевому радиосигналу, в результате совместной обработки измерений параметров излучаемых радиосигналов и использовании данных о пространственном положении фазовых центров антенн.
- 3) Алгоритм многомодальной фильтрации псевдофазовых измерений, позволяющий увеличить область сходимости до 70 %, что снижает вероятность появления аномальной ошибки в 20 раз по сравнению с линейным подходом за счет уменьшения влияния ошибки линеаризации, модификации правила выбора наиболее правдоподобной моды на шаге коррекции и нормировки функции правдоподобия.
- 4) Имитационная модель корабельной радионавигационной системы захода и посадки вертолета на палубу корабля, позволяющая проводить анализ различных алгоритмов вторичной обработки и показавшая, что разработанный алгоритм многомодальной фильтрации по сравнению с известными аналогами условиях высокого коэффициента геометрии  $K_r \gg 2$  обеспечивает уменьшение среднеквадратической погрешности определения координат в 10 и более раз.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов обуславливается использованием адекватного статистического и математического аппарата, представленной методикой проведения вычислительных экспериментов и многократной повторяемостью результатов, а также подтверждается соответствием полученных результатов с результатами, представленными в общедоступной литературе.

### **Внедрение результатов работы**

Основные результаты диссертационной работы внедрены в ОАО «Радиотехнический институт им. академика А.Л. Минца» при разработке технических предложений по реализации

дополнительного канала в изделии «БРИЗ», требуемого для обеспечения посадки вертолета на палубу корабля, что подтверждается соответствующим актом.

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийских и региональных конференциях и изложены в статьях и сборниках тезисов докладов, перечень которых приведен в списке публикаций.

### **Личный вклад автора**

Результаты исследований и теоретических расчетов, представленные в диссертационной работе, получены лично автором или при его непосредственном участии. Рассматриваемые в диссертации алгоритмы вторичной обработки результатов измерений параметров радиосигналов были реализованы в виде моделей и программ лично автором.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложения А. Работа изложена на 160 страницах машинописного текста, содержит 37 рисунков, 5 таблиц и 164 формулы, список литературы включает 69 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** рассмотрены актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Определяются объект и предмет работы, формируются цели и задачи исследования. Конкретизируется научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Формулируются положения, выносимые на защиту, и предъявляется апробация результатов работы.

**В первой главе** приведены требования к морским навигационным системам автоматизированной посадки вертолета, которые помимо стандартных требований, например, климатических, включают: требования к площади размещения и габаритам аппаратуры на корабле, точности определения навигационных параметров вертолета относительно корабля, способности работать в условиях воздействия помех. На основе рассмотренных требований проведен анализ современных средств и методов, обеспечивающих посадку вертолета на палубу корабля. Многообразие рассмотренных методов и средств представлено на рисунке 1. Из результатов анализа следует, что наиболее полно для обеспечения автоматизированного захода и посадки на палубу корабля предъявленным требованиям удовлетворяют локальные радионавигационные системы (ЛРНС).

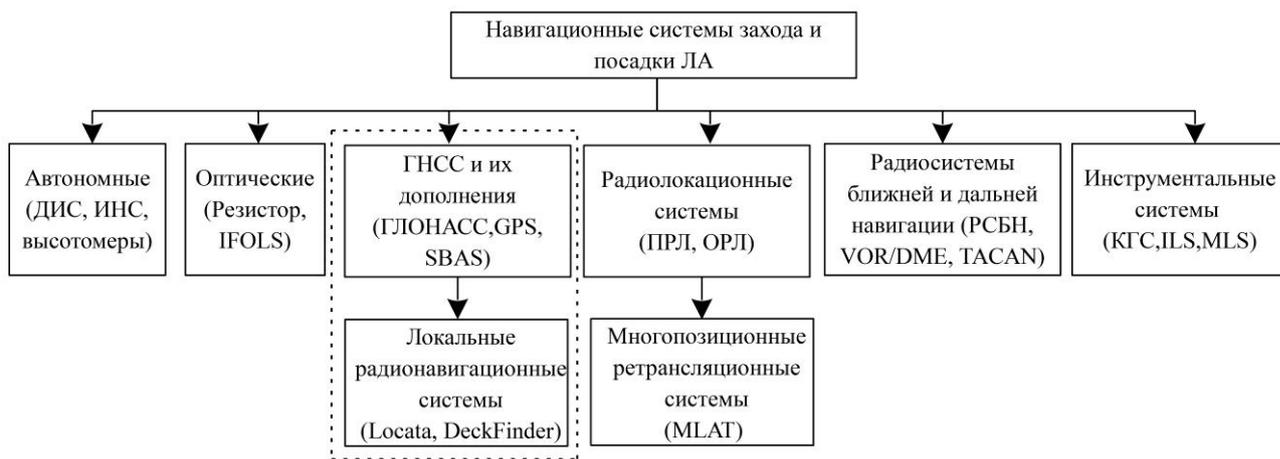


Рисунок 1 - Навигационные системы, обеспечивающие заход и посадку летательного аппарата

Одним из основных требований, предъявляемым к навигационным системам захода и посадки вертолета на палубу корабля, является обеспечение помехозащиты аппаратуры радиосистемы. В связи с этим проведено исследование помехозащиты аппаратуры ЛРНС в сравнении с аппаратурой глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS. Результаты исследования показывают, что требуемое качество приема при воздействии организованных помех в ЛРНС обеспечивается при мощности помехи на 40-50 дБ большей по сравнению с мощностью аналогичной помехи при приеме сигналов ГНСС.

Процесс захода и посадки вертолета на палубу сопровождается качкой корабля, которую принято характеризовать поступательными и вращательными перемещениями корабля. Изменение положения корабля, вызванное качкой необходимо учитывать при определении взаимной ориентации и относительного положения вертолета и корабля. Многообразие методов и средств компенсации качки корабля можно разделить на две группы:

- параметры качки определяются информационно-управляющей системой корабля и передаются по служебным каналам связи в комплекс бортового оборудования вертолета, где производится их учет;
- параметры качки вычисляются специализированной аппаратурой, расположенной на вертолете.

В корабельных ЛРНС для учета качки могут использоваться оба варианта. В первом варианте, данные о качки корабля передаются в навигационной информации, совместно с остальными служебными данными. Во втором варианте используются дополнительные приемники и антенны, установленные на вертолете, которые позволяют помимо координат и скоростей оценить взаимную ориентацию вертолета и корабля.

Несмотря на перечисленные преимущества одним из основных недостатков использования корабельных ЛРНС, является увеличение ошибки определения навигационных параметров вертолета при удалении его от корабля. Это вызвано различными обстоятельствами: высоким коэффициентом геометрии, недостаточным количеством радионавигационных модулей, высокой погрешностью формирования измерений параметров радиосигналов, не выполнением условий когерентности радиосигналов (рассинхронизация модулей), смещением фазовых центров антенн, многолучевостью и другими. Основные пути повышения точности определения навигационных параметров, рассмотренные в диссертационной работе, приведены на рисунке 2.

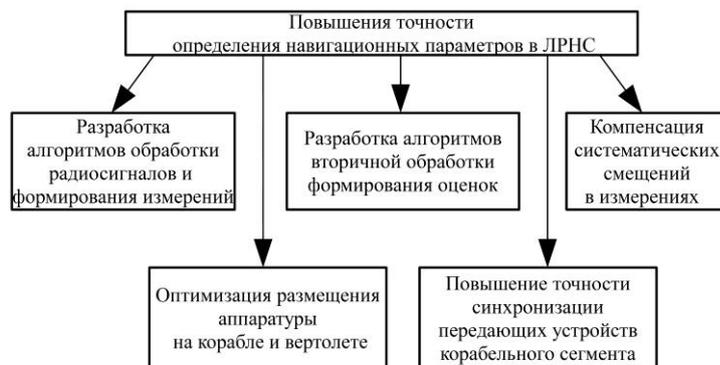


Рисунок 2 - Пути повышения точности определения навигационных параметров в ЛРНС

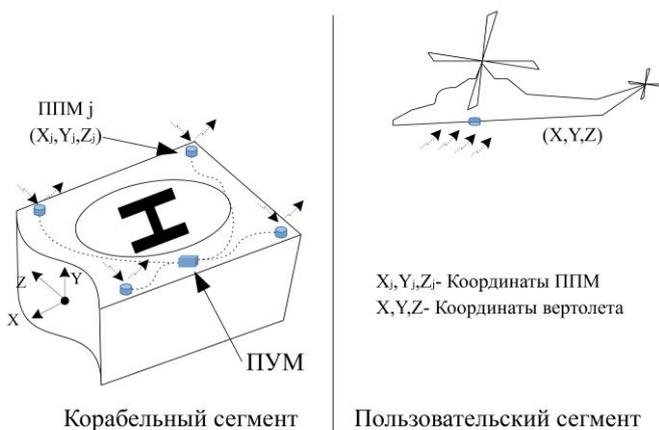


Рисунок 3 - Обобщенная структурная схема ЛРНС с приемо-передающими модулями

В конце первой главы произведена постановка задачи повышения точности определения навигационных параметров вертолета в корабельных ЛРНС и определены пути её решения.

**Во второй главе** рассмотрены принципы построения и функционирования локальных радионавигационных систем посадки вертолета на палубу корабля. На рисунке 3 представлена обобщенная

структурная схема ЛРНС, включающая в себя корабельный и пользовательский сегменты.

Корабельный сегмент служит для формирования навигационного поля в зоне обслуживания системы путем излучения когерентных навигационных радиосигналов. Как правило, он включает в себя набор из  $N_a$  размещенных на корабле радионавигационных модулей и подсистемы управления и мониторинга (ПУМ). В зависимости от вариантов построения каждый модуль может быть приемо-передающим (ППМ) или только передающим (ПрдМ). Подсистема управления и мониторинга обеспечивает синхронизацию передающих устройств модулей и осуществляет контроль работоспособности аппаратуры корабельного

сегмента. Связь ПУМ с каждым модулем осуществляется по служебным каналам связи, например, в соответствии со стандартами Ethernet.

Перспективным для беззапросных радионавигационных систем является применение фазоманипулированных широкополосных псевдошумовых сигналов (ПШС) с базой  $B_{\text{ПШС}} \gg 1$ , обеспечивающих высокоточное измерение параметров радиосигналов, кодовое разделение каналов и помехозащиту радионавигационной системы при воздействии организованных помех.

В навигационном приемнике сигналов корабельных ЛРНС захода и посадки вертолета осуществляется двухэтапная процедура определения координат и скоростей вертолета относительно корабля. На этапе первичной обработки, производится когерентный прием радиосигналов от передающих устройств навигационных модулей корабельного сегмента и формирование измерений параметров радиосигналов (псевдодальности, псевдофазы и псевдодоплера). На этапе вторичной обработки на основе сформированных измерений осуществляется вычисление навигационных параметров вертолета.

Ввиду особенностей размещения навигационных модулей на корабле математические модели измерений псевдодальности  $\rho^j$ , псевдодоплера  $F^j$  и псевдофазы  $\varphi^j$ , где  $j = 1..N_a$ ,  $N_a$ - количество навигационных модулей, можно записать в виде

$$\rho^j = R^j + c\Delta T_p + \xi_{\rho}^j, \quad (1)$$

$$\varphi^j = \frac{R^j}{\lambda} + f_0\Delta T_{\varphi} + k_{\varphi}^j + \xi_{\varphi}^j, \quad (2)$$

$$F^j = -\frac{\dot{R}^j}{\lambda} - \Delta f + \xi_F^j, \quad (3)$$

где  $R^j$ - расстояние между фазовым центром антенны  $j$ -го навигационного модуля и бортового приемника, расположенного на вертолете;  $\Delta T_p$ - суммарная задержка в измерениях псевдодальности, включающая смещение шкалы времени приемника, аппаратурные и тропосферные задержки;  $\Delta T_{\varphi}$ - суммарное смещение в измерениях псевдофазы, включающее смещение шкалы времени приемника, аппаратурные и тропосферные задержки, а также начальную фазу опорного генератора приемника;  $\dot{R}^j$ - радиальная скорость сближения вертолета и корабля;  $\lambda$ - длина волны;  $f_0$ - несущая частота;  $k_{\varphi}^j$ - неопределенное целое число, характеризующее неоднозначность псевдофазовых измерений  $j$ -му навигационному модулю;  $\Delta f$ - смещение частоты опорного генератора приемника, относительно его номинального значения;  $\xi_{\rho}^j, \xi_{\varphi}^j, \xi_F^j$ - ошибки формирования измерений псевдодальности, псевдофазы и псевдодоплера.

В диссертационной работе на основании рекомендаций Международного союза электросвязи показано, что эффекты, связанные с многолучевым распространением, вызванным отражением сигнала от морской поверхности, палубы корабля и надстроек над палубой незначительно влияют на ошибку измерения параметров радиосигналов при использовании псевдошумовых сигналов, передаваемых на несущей частоте  $f=10$  ГГц и организации захода вертолета по глиссаде под углом  $\alpha = 5.7^\circ$ . Ошибка в измерениях, связанная со смещением фазовых центров антенн, может быть уменьшена за счет использования процедур геодезической привязки с использованием современных интерференционных лазерных дальномеров. Перечисленные особенности позволяют не учитывать в (1)-(3) влияние многолучевого распространения радиосигналов и смещения фазовых центров антенн.

Для функционирования рассматриваемой корабельной ЛРНС необходимо обеспечить когерентное излучение сигналов с выходов антенн навигационных модулей корабельного сегмента. В диссертационной работе разработаны методы синхронизации, обеспечивающие когерентное излучение с погрешностью не хуже 0.6 рад, что при длине волны  $\lambda=3$  см соответствует задержке по фазе несущего колебания 10 пс. Разработанный метод синхронизации для структуры с четырьмя

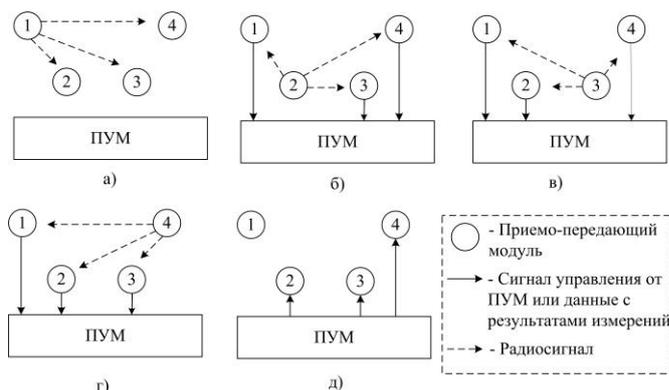


Рисунок 4 - Синхронизации четырех приемо-передающих модулей

приемо-передающими модулями поясняет рисунок 4 и может быть описан следующим образом:

- 1) Работа каждого модуля на прием и излучение производится в строго установленном порядке, в соответствии с принятой очередностью. Выбирается базовый модуль, который задает системную шкалу времени (на рисунке 4 базовым является первый модуль);
- 2) В моменты приема радиосигнала от базового модуля каждый модуль подстраивает опорный генератор под принимаемый сигнал (рисунок 4 а);
- 3) В моменты излучения 2-го, 3-го и 4-го модулей каждый модуль, работающий на прием, производит формирование измерений параметров принимаемых радиосигналов сигналов и передачу результатов в ПУМ (рисунок 4 б), в), г);
- 4) В ПУМ производится формирование управляющих сигналов и передача их на каждый модуль, где они учитываются при подстройке опорных генераторов передатчиков (рисунок 4 д). Формирование управляющих сигналов по фазе несущего колебания  $\hat{\varphi}_{ctrl}^j$  и

задержке модулирующего сигнала  $\hat{t}_{ctrl}^j$  определяется в соответствии со следующими выражениями

$$\hat{\varphi}_{ctrl}^j = \frac{1}{N_a - 2} \sum_i^{N_a - 2} \Delta\varphi_i^j - \frac{\Delta R_i^j}{\lambda} + \Sigma\Delta\xi_{\varphi}^{ij}, i \neq j \neq b, \quad (4)$$

$$\hat{t}_{ctrl}^j = \frac{1}{N_a - 2} \sum_i^{N_a - 2} \frac{\Delta\rho_i^j - \Delta R_i^j}{c} + \Sigma\Delta\xi_{\rho}^{ij}, i \neq j \neq b, \quad (5)$$

где  $b$ - индекс, обозначающий базовый модуль;  $N_a$ - количество навигационных модулей;  $\Delta\rho_i^j = \rho_i^j - \rho_i^b$  - разность псевдодальности между  $j$ -ым и базовым модулями, измеренная на  $i$ -ом модуле;  $\Delta\varphi_i^j = \varphi_i^j - \varphi_i^b$  - разность псевдофазы между  $j$ -ым и базовым модулями, измеренная на  $i$ -ом модуле;  $\Delta R_i^j = R_i^j - R_i^b$  - геометрическая разность между фазовыми центрами антенн  $j$ -ого,  $i$ -ого и базового (индекс  $b$ ) модулей;  $c$ - скорость света;  $\Sigma\Delta\xi_{\rho}^{ij}$  и  $\Sigma\Delta\xi_{\varphi}^{ij}$  - ошибки формирования управляющих сигналов.

Недостатком предлагаемого метода является необходимость наличия как минимум трех приемо-передающих модулей, но в рамках проводимой работы данное ограничение не существенно, так как в рассматриваемых системах количество модулей  $N_a \geq 4$ .

В диссертационной работе предложен и другой метод синхронизации, в этом случае структура системы содержит передающие и один приемный модули. При этом требуется применение опорных генераторов передающих устройств с низким уровнем относительной нестабильности частоты (не хуже  $\delta f = 5 \cdot 10^{-8}$ ), необходимым ввиду инерционности передачи управляющих сигналов по служебным каналам связи. С другой стороны данная структура более проста в реализации.

Предлагаемые методы основаны на измерении расстояния между фазовыми центрами антенн и совместной обработке результатов измерений параметров радиосигналов каждого модуля, и отличаются от известных методов тем, что не требуют процедур калибровки приемо-передающих трактов, что позволяет осуществить синхронизацию во время целевой работы системы.

**В третьей главе** проведен анализ существующих подходов по определению навигационных параметров вертолета в локальной радионавигационной системе посадки на корабль. Показано, что для получения высокой точности определения навигационных параметров необходимо производить совместную обработку измерений псевдодальности, псевдодоплера и псевдофазы радиосигналов с использованием фильтрационных алгоритмов.

Обработка псевдофазовых измерений позволяет более чем в десятки раз повысить точность определения навигационных параметров вертолета, но с другой стороны значительно

усложняет алгоритмы их обработки ввиду присутствия в (2) неизвестного целого  $k_{\varphi}^j$ , характеризующего неоднозначность данного типа измерений.

Говоря о фильтрации неоднозначных фазовых измерений, будем подразумевать определение вектора оцениваемых параметров системы  $\Theta_i$  на  $i$ -ый момент времени при известном его значении в предыдущий момент времени  $\Theta_{i-1}$  и известном векторе измерений  $Z_i$ . Тогда основные уравнения фильтрации можно записать в следующем виде

$$\Theta_i = F(\Theta_{i-1}) + \mathbf{v}_{\Theta} \quad (6)$$

$$Z_i = \begin{bmatrix} Z_{\gamma_i} \\ Z_{\varphi_i} + \mathbf{k}_i \end{bmatrix} = \mathbf{H}(\Theta_i) + \mathbf{v}_z \quad (7)$$

где  $F(\Theta_{i-1})$  - нелинейная вектор-функция, описывающая эволюцию системы;  $\mathbf{H}(\Theta_i)$  - нелинейная вектор-функция связи вектора измерений с вектором оцениваемых параметров;  $\mathbf{v}_{\Theta}$  - вектор центрированных аддитивных гауссовских шумов процесса с ковариационной матрицей  $\mathbf{P}_{\Theta}$ ;  $\mathbf{v}_z$  - вектор центрированных аддитивных гауссовских шумов измерений с ковариационной матрицей  $\mathbf{P}_z$ .

Традиционно для фильтрационной обработки неоднозначных псевдофазовых измерений используются алгоритмы, в которых вектор целочисленных неоднозначностей  $\mathbf{k}_i$  определяется наряду с вектором оцениваемых параметров  $\Theta_i$ . Алгоритмы, в которых  $\mathbf{k}_i$  считается действительным числом, характеризуются относительной простотой реализации, но обладают низкой точностью и большим периодом сходимости по сравнению с алгоритмами, в которых вектор  $\mathbf{k}_i$  считается целым числом и которые требуют применения процедуры разрешения целочисленной неоднозначности.

Существуют алгоритмы многомодальной фильтрации (МФ), которые не требуют включения целочисленного вектора  $\mathbf{k}_i$  в вектор оцениваемых параметров  $\Theta_i$ . При синтезе таких алгоритмов функцию правдоподобия вектора оцениваемых параметров  $L(\Theta_i)$  аппроксимируют усеченной свернутой гауссовской функцией, для которой каждому целочисленному вектору  $\mathbf{k}_i$  ставится в соответствие усеченная гауссовская функция - мода. Таким образом, функцию правдоподобия на основе вектора измерений  $Z_{k_i}$  можно представить в следующем виде

$$f(\Theta_i) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \min_{\mathbf{k}_i} \left( (Z_{k_i} - \mathbf{H}(\Theta_i))^T \mathbf{P}_z^{-1} (Z_{k_i} - \mathbf{H}(\Theta_i)) \right) \right\}, \quad (8)$$

где оператор  $\min_{\mathbf{k}_i}()$  указывает на поиск наиболее правдоподобной моды.

Для того чтобы полностью описать функцию правдоподобия необходимо задать все возможные значения целочисленного вектора  $\mathbf{k}_i$ . На практике ограничиваются лишь конечным числом  $N$  векторов  $\mathbf{k}_i$ , которые последовательно располагаются в списке по убывающим

значениям функции правдоподобия, поэтому далее индекс  $n = 1..N$  обозначает конечное число мод, учитываемых при обработке, а индекс  $i$  опущен для простоты восприятия формул.

Если имеются данные о грубом значении вектора оцениваемых параметров  $\Theta_c$  с гауссовским законом распределения вероятности и ковариационной матрицей  $P_c$ , то функция правдоподобия преобразуется к виду

$$L(\Theta) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \min_{\mathbf{k}_n} \left( (\Theta - \Theta_{\mathbf{k}_n})^T P^{-1} (\Theta - \Theta_{\mathbf{k}_n}) + SM(\mathbf{k}_n) \right) \right\}, \quad (9)$$

$$\Theta_{\mathbf{k}_n} = \Theta_c + P H^T P_z^{-1} \mu_{\mathbf{k}_n}, \quad (10)$$

$$\mu_{\mathbf{k}_n} = Z_{\mathbf{k}_n} - H(\Theta_c) = \begin{bmatrix} Y \\ \Phi + \mathbf{k}_n \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$P = (P_c^{-1} + H^T P_z^{-1} H)^{-1}, \quad (12)$$

$$SM(\mathbf{k}_n) = (\mathbf{k}_n - \mathbf{k}_n^*)^T D_{qq} (\mathbf{k}_n - \mathbf{k}_n^*) + \mu^{*T} D \mu^* - \mathbf{k}_n^{*T} D_{qq} \mathbf{k}_n^*, \quad (13)$$

$$\mu^* = [Y \quad \Phi]^T, \quad (14)$$

$$\mathbf{k}_n^* = -D_{qq}^{-1} D_{qp} Y - \Phi, \quad (15)$$

$$D = P_z^{-1} - P_z^{-1} H P H^T P_z^{-1} = \begin{bmatrix} D_{pp} & D_{pq} \\ D_{qp} & D_{qq} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где  $H$ - матрица направляющих косинусов, полученная в результате разложения  $H(\Theta_i)$  в ряд

Тейлора;  $p, q$ - размерность векторов невязок  $Y, \Phi$  соответственно.

Алгоритмы поиска  $\mathbf{k}_n$  хорошо изучены и активно применяются на практике. Одним из распространенных и эффективных алгоритмов является метод целочисленного унимодального преобразования (ЦУМП-метод или LAMBDA-метод). Используя метод ЦУМП, в диссертационной работе разработана модификация алгоритма МФ, блок-схема которого изображена на рисунке 5, а его функционирование кратко описано следующим образом:

Шаг инициализация. Задаются начальные условия, на основе которых с использование процедуры ЦУМП определяется  $N$  наиболее правдоподобных мод функции правдоподобия (9).

Шаг прогноза. Осуществляется экстраполяция на  $i$ -ый момент времени функции правдоподобия (9), при этом высота каждой моды  $SM(\mathbf{k}_n)$  и значение целочисленного вектора  $\mathbf{k}_n$  остаются неизменными, а положение

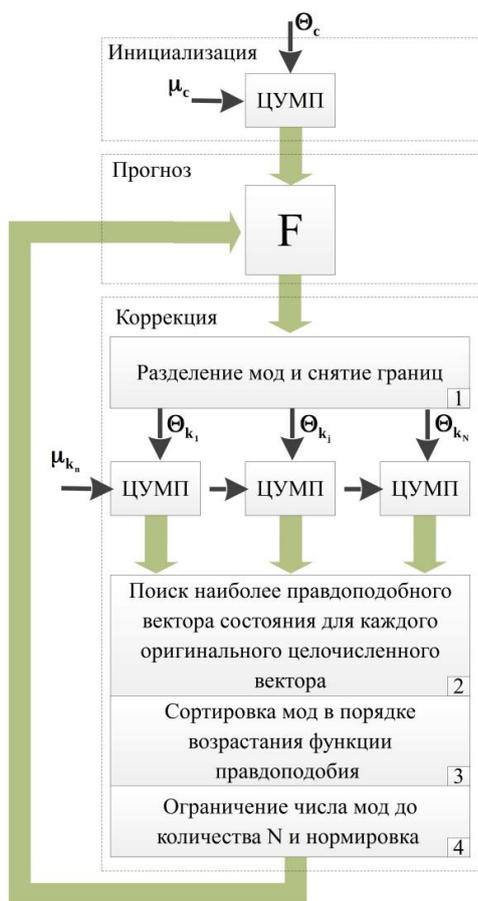


Рисунок 5 - Блок схема алгоритма многомодальной фильтрации

максимумов каждой моды  $\Theta_{k_n}$  и их ковариационная матрица  $\mathbf{P}$  изменяются согласно стандартным процедурам расширенного фильтра Калмана.

Шаг коррекции. Для каждой из  $n = 1..N$  мод экстраполированной функции правдоподобия (9) производится коррекция с учетом поступивших на  $i$ -ый момент времени измерений. Для этого, согласно правилу Байеса, необходимо найти произведение экстраполированной функции (9) и функции правдоподобия вновь поступивших измерений (8). Наиболее удобно данная процедура реализуется путем, снятия границ между модами в (9) и определения произведения каждой неограниченной моды с функцией правдоподобия (8) с использованием алгоритма ЦУМП. При этом предполагается, что в качестве грубого значения вектора оцениваемых параметров  $\Theta_c$  принимается значение максимума выбранной моды  $\Theta_{k_n}$  с ковариационной матрицей  $\mathbf{P}$ . На выходе алгоритма ЦУМП для каждой из  $n = 1..N$  экстраполированных мод формируются список  $\Theta_{k_{nm}}, m = 1..M$ , где  $M$  количество мод учитываемых на шаге коррекции, матрица  $\mathbf{P}$  и список высот каждой моды  $SM(\mathbf{k}_{nm})$ . Если в общих списках присутствуют повторяющиеся вектора  $\mathbf{k}_{nm}$ , то в итоговом списке оставляют значением  $\Theta_{k_{nm}}$  соответствующее минимальному значению  $SM(\mathbf{k}_{nm})$ . Количество мод  $N$  и  $M$  в общем случае может выбираться произвольно, однако наиболее просто алгоритм реализуется, когда  $M = N$ . Шаг коррекции заканчивается ограничением общего списка мод до количества  $N$ , сортировкой их в порядке возрастания значений  $SM(\mathbf{k}_{nm})$  и нормировкой функции правдоподобия.

Далее, при поступлении новых измерений, процесс фильтрации начинается с шага прогноза при использовании данных о положении максимумов наиболее правдоподобных мод, их высот и ковариационной матрицы в предыдущий момент времени.

Предлагаемые улучшения заключаются в следующем:

- 1) На каждом шаге коррекции производится разложение в ряд Тейлора нелинейной функции  $H(\Theta_i)$  в каждой моде экстраполированной функции правдоподобия, что позволяет уменьшить влияние ошибки линеаризации.
- 2) При сравнении значений вектора оцениваемых параметров с одинаковыми целочисленными векторами (блок 2, рисунок 5) выбор наиболее правдоподобного осуществляется на основе высоты соответствующей моды  $SM(\mathbf{k}_{nm})$ .
- 3) На каждом шаге фильтрации предлагается проводить для функции правдоподобия вектора оцениваемых параметров нормировку, позволяющую избежать монотонности роста высоты каждой моды, который в конечном итоге приводит к выравниванию высот, переполнению участков памяти, нарушению работы алгоритма и не позволяет использовать для оценки

достоверности текущих результатов индикатор в виде контрастного отношения  $KNTR_i$ , определяемого для фильтрационных алгоритмов согласно выражению

$$KNTR_i = KNTR_{i-1} \frac{SM(\mathbf{k}_{1,i}) - SM(\mathbf{k}_{2,i})}{SM(\mathbf{k}_{1,i-1}) - SM(\mathbf{k}_{2,i-1})}, \quad (17)$$

где  $i$ - индекс, характеризующий текущий момент времени, а индекс  $(i-1)$  -предыдущий момент;  $SM(\mathbf{k}_{1,i})$ ,  $SM(\mathbf{k}_{2,i})$  - высоты мод, находящихся в списке отсортированных мод на первом и втором местах соответственно.

Особенностью алгоритмов, использующих процедуру разрешения неоднозначности псевдофазовых измерений, является то, что в процессе работы могут возникать аномальные ошибки, связанные с неправильным разрешением неоднозначности и приводящие к скачкообразному увеличению погрешности определения вектора оцениваемых параметров. При увеличении дисперсии грубой оценки, полученной из начальных условий или с предыдущего шага фильтрации, вероятность появления аномальной ошибки увеличивается, что может привести к ситуации, когда в списке целочисленных векторов  $\mathbf{k}_{ni}$  отсутствует истинное значение. В этом случае алгоритм производит оценку локального максимума функции правдоподобия. Область пространства грубых значений вектора оцениваемых параметров, при которых алгоритм МФ в процессе своей работы производит оценку истинного максимума функции правдоподобия (9) обозначим как область сходимости алгоритма. Зависимость объема

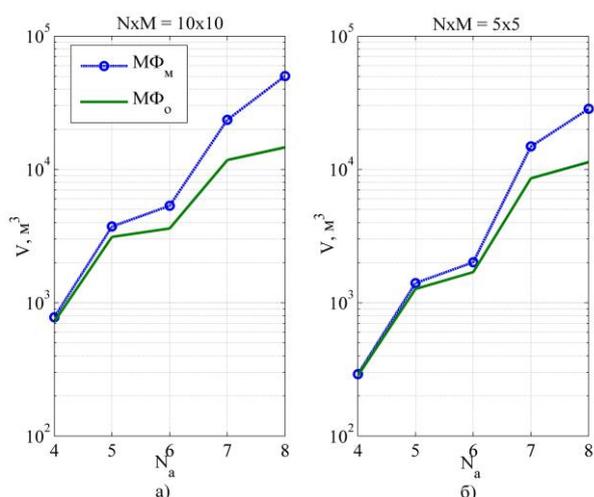


Рисунок 6 - Зависимость объема области сходимости алгоритмов  $MФ_M$  и  $MФ_0$  от количества наземных передатчиков при количестве мод а)  $N_x M = 10 \times 10$ ; б)  $N_x M = 5 \times 5$

области сходимости модифицированного (индекс «м») и оригинального (индекс «о») алгоритмов от количества мод  $N_x M$ , участвующих в обработке, и количества навигационных модулей  $N_a$  представлена на рисунке 6. Результаты исследования показывают, что предлагаемые модификации позволяют увеличить объем области сходимости алгоритма до 70% при  $N_a=8$ , что подтверждает целесообразность и эффективность предлагаемых улучшений.

**В четвертой главе** проведено исследование характеристик работы локальных радионавигационных систем посадки вертолета на палубу корабля. В рамках проводимого исследования решена задача параметрической оптимизации размещения радионавигационных модулей на корабле, при учете ограничений, как на размещение

навигационных модулей, так и на зону обслуживания системы (пространство  $\mathbf{A}$ ). Критерием оптимизации  $J^*$  был выбран минимум коэффициента геометрии  $K_r$

$$J^* = \min_{\mathbf{A}} \sum_i K_r(\mathbf{A}, \Theta_i). \quad (18)$$

Результаты оптимизации размещения навигационных модулей на корабле позволили провести анализ характеристик точности разработанного алгоритма многомодальной фильтрации и сравнить его с используемыми в реальных системах аналогами.

В ходе анализа проводилось сравнение следующих рассмотренных в работе алгоритмов:

- 1) EKF - расширенный фильтр Калмана;
- 2) UKF - сигма-точечный фильтр Калмана;
- 3) ФК<sub>д</sub> - фильтр Калмана, использующий обработку псевдофазовых измерений без разрешения целочисленной неоднозначности и требующий оценивания вектора неоднозначности совместно с остальными параметрами;
- 4) ФК<sub>ц</sub> - фильтр Калмана, использующий обработку псевдофазовых измерений с применением процедуры разрешения целочисленной неоднозначности и требующий оценивания вектора неоднозначности совместно с остальными параметрами;
- 5) МФ<sub>о</sub> - алгоритм многомодальной фильтрации;
- 6) МФ<sub>м</sub> - разработанный в диссертации модифицированный алгоритм многомодальной фильтрации.

В ходе исследования полагалось, что измерения формируются схемой первичной обработки со среднеквадратической погрешностью (СКП), не превышающей потенциально достижимого значения границы точности, и равной для псевдодальности  $\sigma_\rho=0.5$  м, псевдодоплера  $\sigma_F = 0.5$  Гц и псевдофазы  $\sigma_\varphi=0.05$  цикла, темп выдачи измерений составил  $f_d = 100$  Гц, а значение несущей частоты  $f_n = 10$  ГГц. Формирование результатов проводилось по серии из  $N_{\text{exp}} = 384$  экспериментов, количество которых определяется для уровня доверия  $Q = 0.95$  и погрешности  $\varepsilon$  оценки равной одной десятой от оцениваемой величины.

При анализе характеристик точности для алгоритмов EKF и UKF полагалось известным значение вектора неоднозначности псевдофазовых измерений, что позволило получить потенциально достижимую погрешность определения навигационных параметров с использованием псевдофазовых измерений. Зависимости суммарной СКП определения координат  $\sigma_{\Sigma,c}$  и скоростей  $\sigma_{\Sigma,v}$  от расстояния между кораблем и вертолетом для алгоритма UKF представлены на рисунке 7. Результаты аналогичного исследования для EKF показали схожие результаты и не приведены на рисунке 7.

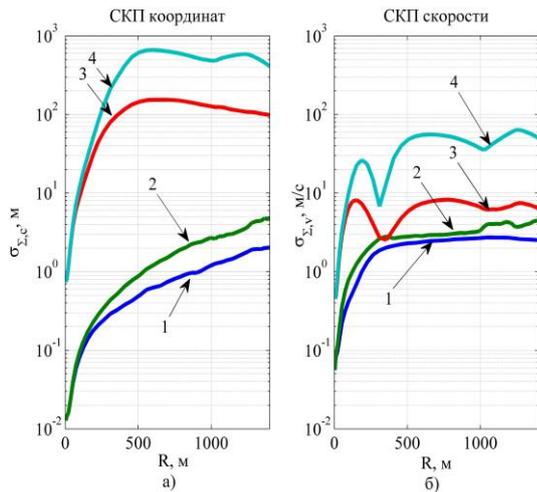


Рисунок 7 - СКП оценок координат (а) и скоростей (б) вертолета, полученных алгоритмом UKF, для различных комбинаций измерений: 1) псевдодальности, псевдодоплера, псевдофазы; 2) разностные измерения псевдодальности, псевдодоплера и псевдофазы; 3) псевдодальности и псевдодоплера; 4) разностные измерения псевдодальности и псевдодоплера

Согласно полученным результатам можно сделать вывод о целесообразности обработки измерений псевдодальности, псевдодоплера и псевдофазы, по сравнению с обработкой их разностей. Данное преимущество может быть объяснено тем, что задача определения координат при известной модели расхождения шкал времени по точности оценки стремится к дальномерной задаче, которая обладает меньшим коэффициентом геометрии и позволяет производить оценку с более высокой точностью. Однако, для того, чтобы получить выигрыш по точности при обработке измерений псевдодальности, необходимо как можно точнее знать модель расхождения шкалы времени приемника для измерений псевдодальности  $\Delta T_p$  и псевдофазы  $\Delta T_\phi$ , включающие различные систематические смещения согласно выражениям (1)-(3).

Проведено исследование погрешностей определения координат и скоростей для разработанного алгоритма многомодальной фильтрации при полете вертолета по траектории двух разворотов и при движении со скачкообразно меняющейся угловой скоростью. Результаты зависимости СКП определения координат  $\sigma_{\Sigma,c}$  и скоростей  $\sigma_{\Sigma,v}$  от расстояния между кораблем и вертолетом представлены для различных алгоритмов на рисунке 8.

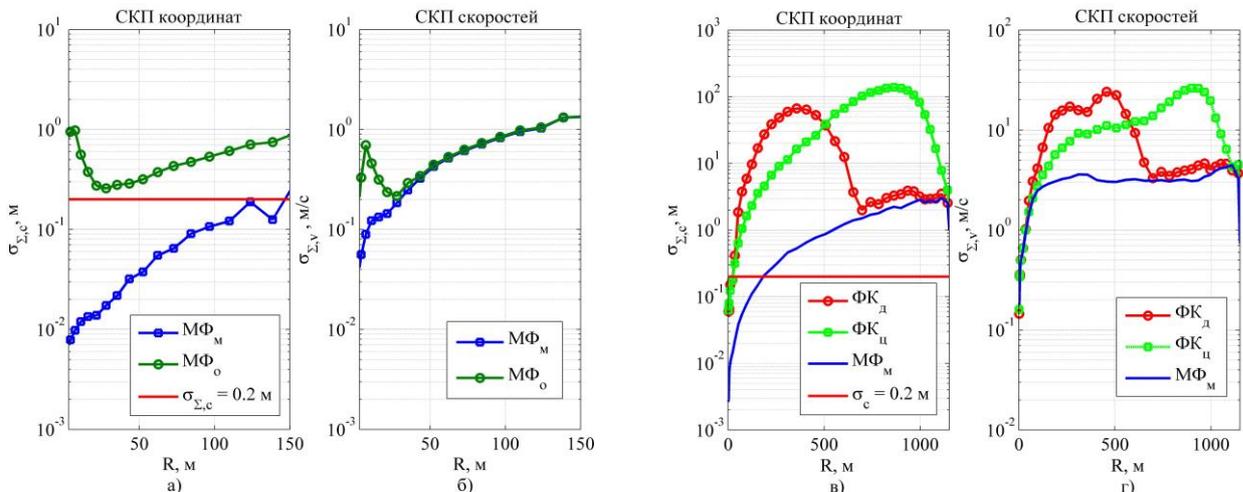


Рисунок 8 - СКП определения навигационных параметров для различных алгоритмов

В ходе проводимых опытов производилось оценка вероятности аномальной ошибки, результаты которого показали (рисунок 8 а), б), что предлагаемые улучшения позволяют снизить вероятность появления аномальной ошибки в 20 раз и, тем самым, уменьшить СКП определения координат в 10 и более раз.

В рамках проведенных исследований продемонстрировано (рисунок 8 в), г), что алгоритмы, требующие включения в вектор оцениваемых параметров вектора неоднозначности позволяют получить точность определения координат и скоростей сравнимую с разработанным

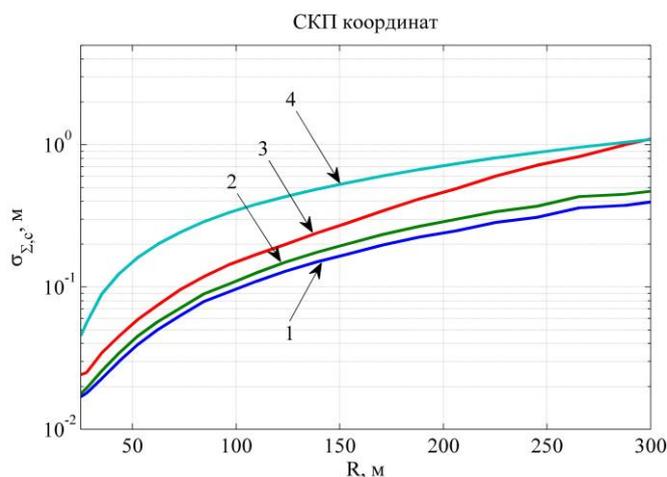


Рисунок 9 - Зависимость ошибки определения координат от дальности между вертолетом и кораблем при 1)  $\sigma_a = 0.1$  мм; 2)  $\sigma_a = 1$  мм; 3)  $\sigma_a = 5$  мм; 4)  $\sigma_a = 10$  мм

алгоритмом лишь при уменьшенной ошибке измерений. Результаты, представленные на рисунке 8 в), г), получены при  $\sigma_p = 0.01$  м.

Проведен анализ влияния смещения фазовых центров антенн на погрешность определения координат, результаты которого представлены на рисунке 9. Показано, что для определения координат вертолета с СКП равной  $\sigma_c \leq 0.2$  м, СКП смещения фазовых центров антенн не должна превышать значения  $\sigma_a \leq 1$  см, что удастся получить, используя современные методы топографической

привязки с использованием лазерных дальномеров интерференционного типа. Для уменьшения влияния неравномерности фазовых характеристик направленности антенн на СКП определения координат и скоростей необходимо применять однотипные антенны и при размещении на корабле ориентировать их в одном направлении.

**В заключении представлены основные результаты диссертационного исследования:**

- 1) Продемонстрировано, что для обеспечения автоматизированной посадки вертолета на палубу корабля необходимо обеспечить синхронизацию передающих устройств модулей, осуществлять фильтрационную обработку измерений псевдодальностей, псевдодоплера и псевдофазы, а также компенсировать систематические смещения в измерениях.
- 2) Разработаны методы синхронизации радионавигационных модулей ЛРНС, позволяющие обеспечить когерентность излучения сигналов передающих устройств модулей со среднеквадратической погрешностью не хуже 0,6 рад, что соответствует задержке по времени фазы несущего колебания равной 10 пс при несущей частоте  $f_0 = 10$  ГГц.
- 3) Разработан алгоритм многомодальной фильтрации, в основе которого лежит метод оптимального линейного рекуррентного оценивания и его развитие на класс нелинейных

задач с применением процедуры разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений. Показано, что разработанный алгоритм позволяет увеличить зону сходимости алгоритма до 70 %, что снижает вероятность появления аномальной ошибки в 20 раз по сравнению с линейным подходом и позволяет уменьшить погрешность определения координат в 10 и более раз.

- 4) Решена задача параметрической оптимизации размещения навигационных модулей на корабле при условии ограничения зоны обслуживания системы и конструктивных особенностей корабля.
- 5) Проведен анализ влияния смещения фазовых центров антенн на погрешность определения координат. Даны рекомендации по уменьшению влияния смещения фазовых центров антенн на погрешности определения координат.

Дальнейшее развитие темы диссертационного исследования связано с созданием полностью автономных ЛРНС посадки, которые помимо координат и скоростей позволяют определять ориентацию вертолета относительно корабля, интерес также представляет исследование многолучевого распространения сигналов в ЛРНС и повышения помехозащиты радиосистемы.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Основные результаты диссертационного исследования изложены в 8 печатных работах, среди которых 4 статьи опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов ВАК, рекомендованных для публикации основных научных результатов диссертации, 1 патент и 3 публикации в сборниках докладов Всероссийских и региональных конференций:

- 1) Кишко Д.В. Влияние смещения фазовых центров антенн на точность определения координат летательных аппаратов в радионавигационных корабельных системах посадки. // «Наукоемкие технологии», М.: Радиотехника. 2015, № 8 стр. 31-35.
- 2) Кишко Д.В. Определение координат объекта на основе многомодовой фильтрации неоднозначных фазовых измерений // Электронный журнал «Труды МАИ», Москва, 2015, № 82.
- 3) Кишко Д.В. Синхронизация передающих устройств распределенных радиотехнических систем навигации и посадки летательного аппарата // Электронный журнал «Труды МАИ», Москва, 2015, № 82.
- 4) Кишко Д.В. Анализ точности определения собственных координат при использовании радионавигационной системы с малыми базами между передатчиками. // Электронный журнал «Труды МАИ», Москва, 2014, № 78.

- 5) Урличич Ю.М., Жодзишский А.И., Большаков В.О., Нестеров О.В., Кишко Д.В. Способ определения местоположения объекта при использовании глобальных навигационных спутниковых систем и система для его реализации. – Патент на изобретение RU № 2492499 С1 от 01.03.2012
- 6) Шевченко Р.А., Прядкин С.П., Кишко Д.В., Ялин А.К. Решение задач ближней навигации и посадки вертолетов при использовании сигналов широкополосных радиолиний связи. «Перспективы развития РЛС дальнего обнаружения и интегрированных систем и комплексов информационного обеспечения Воздушно-космической обороны (РТИ Системы ВКО-2013)». Всероссийская научно-техническая конференция: Сборник материалов. – М.: Вега-Инфо, 2013. – 328 с.
- 7) Прядкин С.П., Кишко Д.В., Шевченко Р.А. Комплексный способ определения координат, вектора путевой скорости и дальности авиационно-космических объектов на основе разностно-дальномерного метода. «Перспективы развития РЛС дальнего обнаружения и интегрированных систем и комплексов информационного обеспечения Воздушно-космической обороны (РТИ Системы ВКО-2014)»: II Всероссийская научно-техническая конференция: – Сборник материалов. – М.: Радиотехника, 2014, - 368 с.: ил.
- 8) Шевченко Р.А., Кишко Д.В. Средства и методы посадки летательного аппарата на палубу корабля. Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике - 2015». 21-23 апреля 2015 года. Москва. Сборник тезисов докладов.