

На правах рукописи

КОРОГОДИН Илья Владимирович

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ В АППАРАТУРЕ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре Радиотехнических систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Перов Александр Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Власов Игорь Борисович,
профессор МГТУ им. Н. Э. Баумана

кандидат технических наук
Перьков Александр Евгеньевич,
старший научный сотрудник
ОАО «Российские космические системы»

Ведущая организация: ОАО «Научно-исследовательский институт космического приборостроения»
(ОАО «НИИ КП»)

Защита состоится 4 апреля 2013 года в 15:30 на заседании диссертационного совета Д 212.157.05 при ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., 17, **аудитория А-402.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: **111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14, Ученый совет НИУ «МЭИ».**

Автореферат разослан «01» марта 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.157.05
кандидат технических наук, доцент

Т.И.Курочкина

Введение

Осенью 1957 года Советским Союзом был запущен первый искусственный спутник Земли. Благодаря ему экспериментально подтвердилась возможность определения положения приемника по спутниковым сигналам.

Успех первых экспериментов и большой потенциал практического применения привели к созданию в 60-70гг спутниковых радионавигационных систем (СРНС) первого поколения – Транзит, Циклон, Цикада. Их появление стало прорывом в навигации. Тем не менее, практика использования выявила и недостатки, исправить которые призваны системы второго поколения. На данный момент в штатной эксплуатации находятся две СРНС второго поколения - NAVSTAR GPS и ГЛОНАСС.

Системы состоят из трех сегментов – наземного комплекса управления, группировки навигационных космических аппаратов (НКА) и навигационной аппаратуры потребителей (НАП).

СРНС предоставляют потребителю сервис, в который входит определение положения и скорости, а так же обеспечение шкалой времени, синхронизированной с некоторым мировым стандартом. Для полного определения состояния потребителя, как объекта навигации, в этом случае не хватает его ориентации. Возможно построение НАП, дополняющей традиционные навигационно-временные определения (НВО) измерениями параметров пространственной ориентации объекта. НАП данного типа носят название угломерной навигационной аппаратуры потребителей (УНАП).

Применение УНАП востребовано у широкого круга потребителей. Это различного рода летательные аппараты, суда, артиллерийские системы и т.д.

Высокая точность определения параметров ориентации достигается с помощью принципов фазовой углометрии. Разности фаз (РФ) спутниковых сигналов, наблюдаемых на множестве пространственно разнесенных точек, функционально связаны с положением потребителя, спутника и ориентацией приемных точек относительно линии спутник-потребитель (см. рис. 1).

Таким образом, измерив разности фаз, можно оценить ориентацию антенной

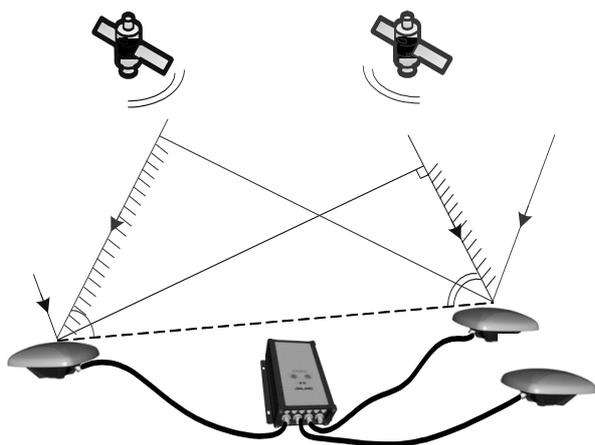


Рис. 1. Связь ориентации антенн УНАП с разностью фаз

системы. УНАП СРНС, основанная на измерениях относительных фаз, рассматривается в данной работе и выступает в качестве **объекта** диссертационного исследования. **Предметом** же исследования являются способы реализации первичной обработки сигналов в УНАП, где под первичной обработкой радиосигналов понимаются преобразования, позволяющие сформировать оценки параметров сигналов радио-

или промежуточной частоты, достаточные для формирования расширенных НВО.

Характеристики УНАП, рассматриваемые в работе, – помехоустойчивость (способность выполнять функции при воздействии помех), чувствительность (способность выполнять функции при ослаблении сигнала), точность. Существующие образцы УНАП отстают от классических одноантенных приемников по помехоустойчивости и чувствительности, задача улучшения этих характеристик **актуальна**. Можно выделить две основные причины отставания: во-первых, на данном этапе развития технологии в УНАП не применялись системы пространственного подавления помех (этот аспект в работе не рассматривается), во-вторых, существующие образцы УНАП используют когерентный режим работы. Идея создать некогерентный алгоритм УНАП – основная в данной работе.

Целью диссертационной работы является улучшение потребительских характеристик угломерной НАП СРНС. Достижение цели предполагается путем оптимизации алгоритмов первичной обработки навигационных радиосигналов, в том числе за счет применения подходов некогерентного приема сигналов. В качестве основных потребительских характеристик в работе выступает помехоустойчивость и чувствительность НАП, а так же точность НВО.

Для достижения поставленной цели в диссертационном исследовании решен ряд **задач**:

1. Синтез и анализ некогерентных алгоритмов оценивания (фильтрации) параметров сигналов ПЧ, в том числе:

1.1 Разработка корректной математической модели наблюдений сигналов ПЧ и их параметров; выбор критерия решения задачи оценки параметров.

1.2 Разработка методики определения потенциальных характеристик оценивания параметров сигналов.

1.3 Синтез и анализ алгоритма оценивания параметров сигналов промежуточной частоты: рекурсивных фильтрационных алгоритмов, дискриминаторов параметров сигналов.

1.4 Расчет потенциальных характеристик на основании разработанной методики, расчет характеристик синтезированных и существующих алгоритмов, их сравнение с потенциальными.

2. Разработка методики и алгоритмов компенсации погрешностей, вносимых в оценки разностей фаз неидентичностью характеристик радиочастотных блоков:

2.1 Обоснование возможности решения задачи компенсации погрешностей при добавлении функции коммутации радиочастотных блоков (РЧБ).

2.2 Модификация алгоритмов слежения за параметрами сигналов ПЧ в условиях работы коммутатора РЧБ; измерение параметров, необходимых для расчета РФ сигналов антенных модулей.

2.3 Разработка алгоритма расчета РФ сигналов с выходов антенных модулей на основе измеренных параметров сигналов ПЧ.

2.4 Анализ характеристик разработанных алгоритмов с помощью имитационного моделирования.

2.5 Экспериментальные исследования характеристик опытного образца, реализующего разработанные алгоритмы и коммутацию РЧБ.

Методы исследования При решении поставленных задач использованы методы теории вероятностей и математической статистики, статистической теории радиотехнических систем, теории оптимальной фильтрации случайных процессов, имитационного компьютерного моделирования, вычислительной математики, программирования, исследования характеристик экспериментальных макетов и серийной НАП.

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1. Предложена новая математическая модель параметров сигналов радио- и промежуточной частоты угломерной НАП. Она отличается разделением параметров сигналов на две группы, одна из которых характеризует поступательное движение объекта относительно спутника (задержка, частота, «общая» фаза), а вторая – вращательное движение объекта (разности фаз сигналов).

2. Получен алгоритм оптимальной нелинейной фильтрации в гауссовском приближении с использованием разложения логарифма функции правдоподобия в произвольной точке пространства состояний.

3. Методами теории оптимальной фильтрации в гауссовом приближении, с использованием предложенной математической модели описания параметров сигналов и алгоритмов решения уравнений Стратоновича в гауссовом приближении, решена задача синтеза квазиоптимального некогерентного алгоритма оценивания параметров сигналов промежуточной частоты.

4. Для синтезированных дискриминаторов частоты, задержки и разности фаз получены аналитические выражения для расчета дискриминационных характеристик и дисперсий шумов на выходе дискриминатора.

5. Разработана методика анализа потенциальных характеристик оценок параметров сигналов, основанная на численном решении уравнений Стратоновича для апостериорной плотности вероятности оцениваемых параметров, по которой рассчитываются оптимальные, по тому или иному критерию, оценки параметров сигналов.

6. Разработана методика и алгоритмы компенсации погрешностей, вносимых неидентичностью характеристик радиочастотных блоков в оценки разностей фаз, основанные на использовании коммутаторов, производящих циклическое переключение радиочастотных блоков УНАП, анализе разностей фаз сигналов при прохождении различных РЧБ и последующей компенсации соответствующей погрешности в измерениях.

7. Решена задача синтеза уточненного квазиоптимального некогерентного алгоритма оценивания параметров сигналов промежуточной частоты в УНАП,

учитывающего циклическое переключение радиочастотных блоков.

Практическая ценность работы

1. Разработанный некогерентный алгоритм обработки сигналов обеспечивает существенное повышение помехоустойчивости (до 8 дБ) и чувствительности (на 7-17 дБ) УНАП. При низкой динамике вращательных движений происходит снижение среднеквадратической ошибки оценок РФ в 3-4 раза.

2. Разработанный некогерентный алгоритм обработки сигналов позволяет ослабить требования к нестабильности опорного генератора, что ведет к упрощению и удешевлению аппаратуры.

4. Разработанный алгоритм прямой оценки разности фаз сигналов в отдельных ситуациях позволяет проводить НВО даже при воздействии сильных помех. Данная возможность обусловлена тем, что в первом приближении УНАП обладает свойством пространственной селекции сигналов.

5. Предложенная методика решения уравнений Стратоновича для апостериорной плотности вероятности оцениваемых параметров сигнала в гауссовом приближении дает разработчику определенную свободу при выборе опорных сигналов корреляторов. Например, в диссертации опорные сигналы корреляторов обработки сигналов различных антенн выбраны совпадающими в рамках одного канала обработки. Это позволяет существенно упростить структуру корреляторов и снизить интенсивность обмена между процессором и коррелятором.

6. Предложенные алгоритмы перекоммутации радиочастотных блоков, приема сигналов и коррекции измерений позволяют нивелировать влияние неидентичности характеристик радиочастотных блоков УНАП, что повышает точность формируемых оценок и снижает требования к характеристикам РЧБ.

7. Разработанный алгоритм численного решения уравнений Стратоновича для апостериорной плотности вероятности оцениваемых параметров сигнала применим для сравнения характеристик разнообразных алгоритмов, используемых в навигационной аппаратуре, с потенциальными характеристиками решения их задач.

Реализация и внедрение результатов исследования Результаты исследований использованы при выполнении НИР и ОКР:

1. ОКР «Разработка навигационной аппаратуры потребителей, работающей по сигналам перспективных глобальных навигационных спутниковых систем, предназначенной для оснащения частей и подразделений Сухопутных войск», «Перспектива-С», ОАО «НИИ космического приборостроения».

2. НИР «Разработка радионавигационной аппаратуры оценки угловой ориентации и местоположения носителя», ООО «Коэнергия».

3. НИР «Исследование вопросов помехозащиты аппаратуры спутниковой навигации военного и специального назначения, средств НКУ и бортовых информационно-навигационных комплексов системы ГЛОНАСС», «Вальсет». Заказчик «Министерство обороны РФ».

4. НИР «Исследования по созданию устройства определения параметров пространственной ориентации объекта по сигналам КНС», «Гратис-МЭИ», ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем».

Внедрение результатов исследования подтверждены актами, полученными в ОАО «НИИ космического приборостроения» и НИУ «МЭИ».

Апробация результатов Результаты работы докладывались и обсуждались на четырнадцатой, пятнадцатой, шестнадцатой, семнадцатой и восемнадцатой международной НТК студентов и аспирантов «Радиотехника, электроника и энергетика (Москва, 2008-2012 гг); на втором межотраслевом научно-техническом форуме «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (Москва, 2010 г); на восьмой и девятой НК «Радионавигационные Технологии в Приборостроении» (Туапсе, 2010-2011 гг); на семнадцатой международной НТК «Радиолокация Навигация Связь» (RLNC-2011, Воронеж, 2011 г).

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. Квазиоптимальный некогерентный алгоритм оценивания параметров (разности фаз сигналов, принятых в пространственно разнесенных точках, задержка и смещение частоты) сигналов промежуточной частоты, синтезированный методами теории оптимальной фильтрации с использованием предложенной математической модели описания параметров сигналов и алгоритмов решения уравнений Стратоновича в гауссовом приближении, и его характеристики.

2. Методика анализа потенциальных характеристик оценок параметров сигналов, принятых на множестве пространственно разнесенных точек, основанная на численном решении уравнений Стратоновича для апостериорной плотности вероятности оцениваемых параметров с последующим расчетом оптимальных, в том или ином смысле, оценок параметров сигналов по рассчитанной апостериорной ПВ, и получающиеся с использованием этой методики характеристики.

3. Упрощенный некогерентный алгоритм оценки задержки, частоты и разностей фаз сигналов промежуточной частоты, принятых на множестве пространственно разнесенных точек, ориентированный на практическую реализацию в УНАП и рекомендуемый для практического использования.

4. Результаты моделирования и экспериментальных исследований разработанных некогерентных алгоритмов оценивания параметров сигналов в УНАП.

5. Методика и алгоритмы компенсации неидентичности характеристик радиочастотных блоков, основанные на использовании коммутаторов, производящих циклическое переключение радиочастотных блоков УНАП, анализе разностей фаз сигналов при прохождении различных РЧБ и последующей компенсации соответствующей погрешности в измерениях. Результаты их моделирования и экспериментальных исследований.

Структура и объем работы По своей структуре диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 270 страницах машинописного текста (включая 85 страницы приложений), содержит 74 рисунка (включая 4 в приложениях), 6 таблиц и список литературы из 53 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы и решаемых задач, формулируется цель исследования, определяется научная новизна и практическая ценность результатов, вводятся основные используемые понятия, описывается принцип фазовой углометрии, определяется перечень задач, решение которых необходимо для достижения цели исследования, производится описание общей функциональной схемы построения угломерной НАП.

В первой главе проводится общая постановка задачи оценивания частоты, задержки и разности фаз сигналов промежуточной частоты УНАП, а так же разрабатывается методика анализа потенциальных характеристик оценивания, основанная на решении уравнений Стратоновича для апостериорной плотности вероятности.

Основные особенности выбранной постановки задачи заключаются в следующем:

1) Разделение параметров сигналов на две группы: параметры (задержка, смещение частоты, «общая» фаза), изменение которых обусловлено поступательным движением объекта, и параметры (разности фаз и их производные), изменение которых обусловлено вращением объекта.

2) Общая фаза относится к неинформативным параметрам, и её оценивание не требуется. Эта особенность позволяет выполнить синтез некогерентных алгоритмов путем усреднения апостериорной плотности вероятности по общей фазе.

В результате для сигнала на выходе радиочастотного блока, подключенного к m -му антенному модулю, принята модель:

$$S_{m,i(k,l)} = A G_c(t_i - \tau_k) \times \\ \times \cos(\omega_{if} t_i + (\omega_k + \psi'_{m,k})(t_{k,l} - t_{k,1}) + \varphi_{1,k} + \psi_{m,k}), m = 1..M$$

где A — амплитуда; $G_c(t_i - \tau_{1,k})$ — функция модуляции дальномерным кодом; τ_k — задержка; ω_{if} — промежуточная частота; $\varphi_{1,k}$ — «общая» фаза сигналов; ω_k — доплеровское смещение частоты; $\psi_{m,k}$ — разности фаз сигналов на m -м и первом антенных элементах; $\psi'_{m,k}$ — производная разности фаз, M - число антенн.

Разработанная методика анализа потенциальных характеристик оценивания базируется на прямом решении уравнений Стратоновича для апостериорной плотности вероятности (ПВ) $p(\mathbf{x}_k | \mathbf{Y}_{1,1}^{k,L})$ распределения вектора состояния \mathbf{x}_k с последующим получением *оптимальных оценок* параметров по заданному критерию. В качестве критериев выбран минимум среднего риска при простой и квадратичной функциях потерь. Оптимальные оценки параметров находятся из сформированной в результате решения уравнения Стратоновича апостериорной ПВ.

На рис. 2 приведена схема, отображающая процесс решения уравнения Стратоновича, где обозначено: $\mathbf{y}_{k,l}$ — наблюдаемые в момент времени $t_{k,l}$ отсчеты АЦП; $\mathbf{Y}_{1,1}^{k,L}$ — наблюдения полученные к моменту времени $t_{k,L}$.

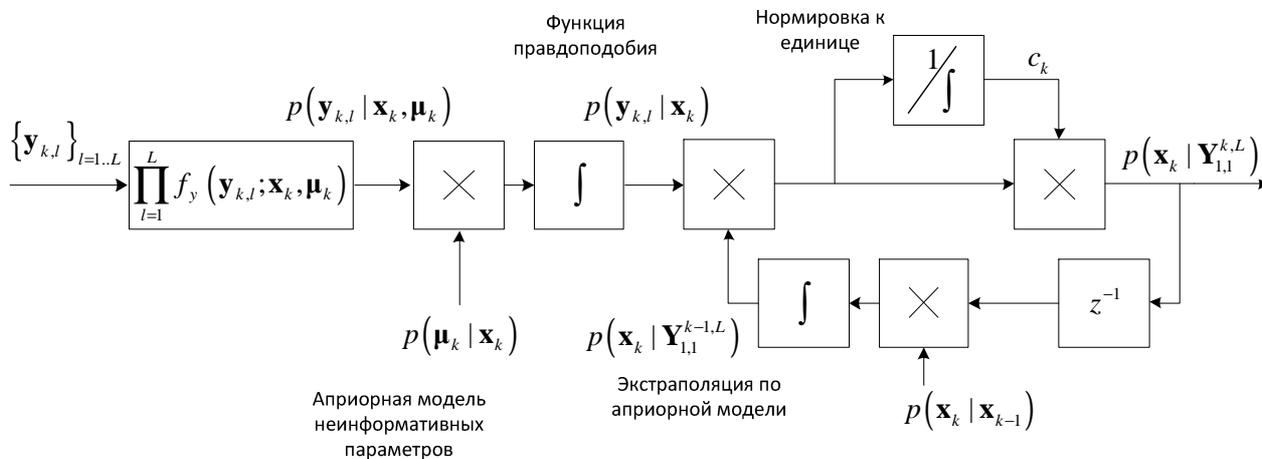


Рис. 2. Схема расчета апостериорной ПВ вектора состояния

В главе приводятся уравнения Стратоновича для апостериорной ПВ для заданной постановки задачи, описываются алгоритмы численного решения этих уравнений и алгоритмы последующего получения оценок параметров сигнала. На рис. 3 в качестве примера приведена реализация совместной апостериорной ПВ РФ ψ и её производной ψ' при низком отношении сигнал/шум. Отмечено, что предложенный алгоритм обладает большой вычислительной сложностью, поэтому его применение целесообразно только для выявления потенциальных характеристик решения задачи оценивания параметров сигналов в УНАП.

Во второй главе проводится синтез и анализ квазиоптимальных некогерентных алгоритмов оценивания разностей фаз, частоты и задержки сигналов промежуточной частоты в угломерной НАП. Для этого используется подход, основанный на аппроксимации апо-

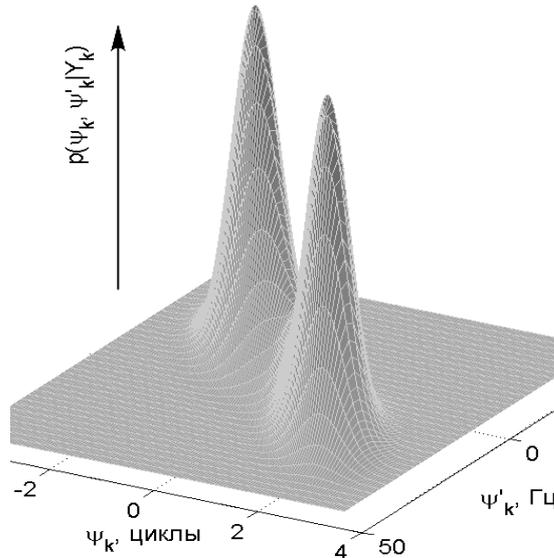


Рис. 3. Реализация совместной апостериорной ПВ РФ и её производной при низком отношении сигнал/шум

стериорной ПВ многомерным гауссовским законом с последующей записью уравнений для математического ожидания и матрицы дисперсий ошибок фильтрации вектора состояния. Особенностью синтеза является то, что использовано разложение нелинейных функций не в точке экстраполированных значений вектора состояния (как это принято в известных алгоритмах), а в другой точке $\tilde{\mathbf{x}}_k$, названной «опорной». Опорная точка определяет параметры опорных сигналов коррелятора, а её выбор становится прерогативой разработчика. Полученный в результате синтеза алгоритм обработки схематически приведен на рис. 4, где обозначено:

$\tilde{\mathbf{x}}_k = \left[\tilde{\mathbf{x}}_{\psi 2,k}^T \quad \dots \quad \tilde{\mathbf{x}}_{\psi M,k}^T \quad \tilde{\mathbf{x}}_{\omega,k}^T \quad \tilde{\tau}_k \right]^T$ — вектор опорных параметров; $L_k(\mathbf{c}\tilde{\mathbf{x}}_k)$ — логарифм функции правдоподобия; $\mathbf{D}_{x,k}$ — матрица дисперсий ошибок фильтрации.

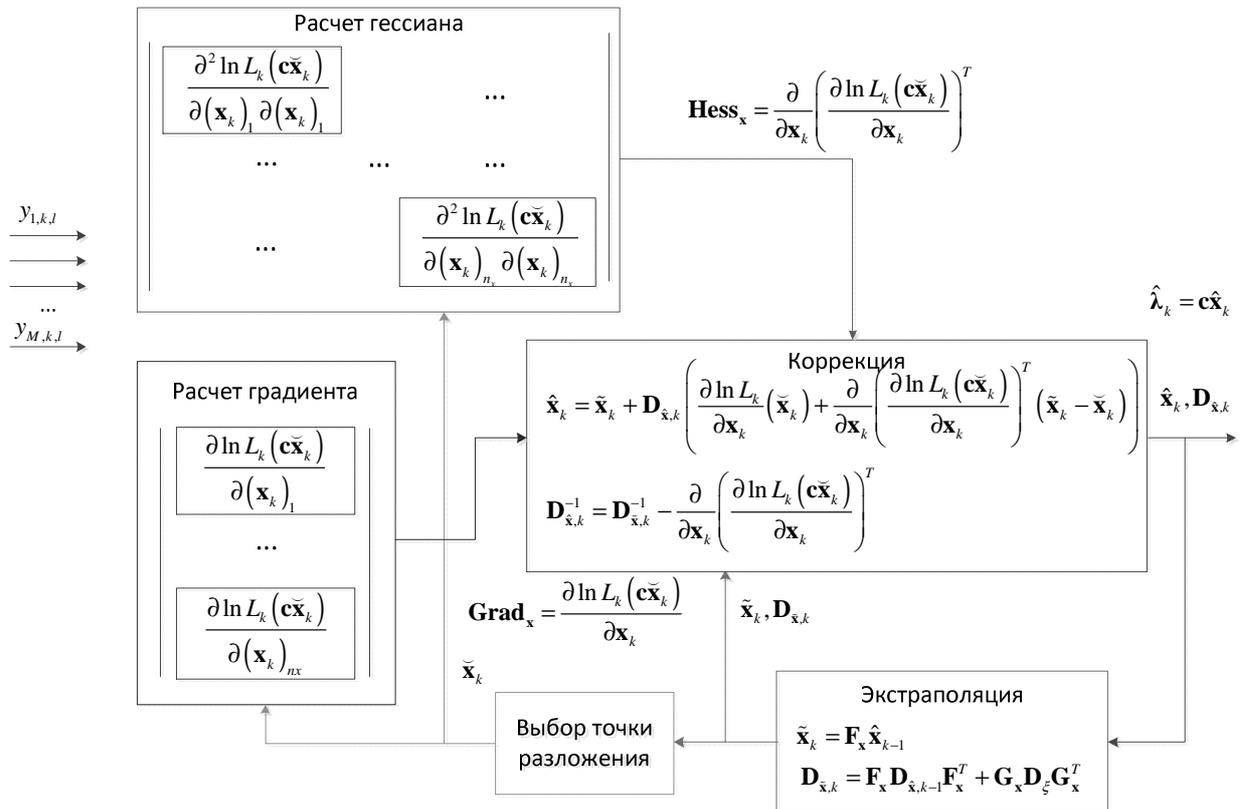


Рис. 4. Схема квазиоптимального алгоритма обработки

Синтезированный алгоритм включает оптимальные дискриминаторы соответствующих параметров сигналов и комплексный сглаживающий фильтр. Приводятся результаты аналитического расчета дискриминационных характеристик дискриминаторов параметров $\lambda_k = \mathbf{c}\mathbf{x}_k$

$$\mathbf{u}_{\lambda,k}(\lambda_k) = \frac{\partial \ln L_k(\lambda_k)}{\partial \lambda_k}$$

и дисперсий шумов на выходе дискриминаторов. На рис. 5 приведен пример рассчитанных дискриминационных характеристик дискриминатора разности фаз.

В диссертации разработан упрощенный квазиоптимальный алгоритм оценивания, ориентированный на практическую реализацию в УНАП. Данный алгоритм получен из описанного выше квазиоптимального некогерентного алгоритма в результате использования пяти дополнительных допущений. Итоговая структура системы оценивания параметров сигналов промежуточной частоты состоит из систем слежения за задержкой (ССЗ), частотой (ССЧ) и разностями фаз (ССРФ) (см. рис. 6).

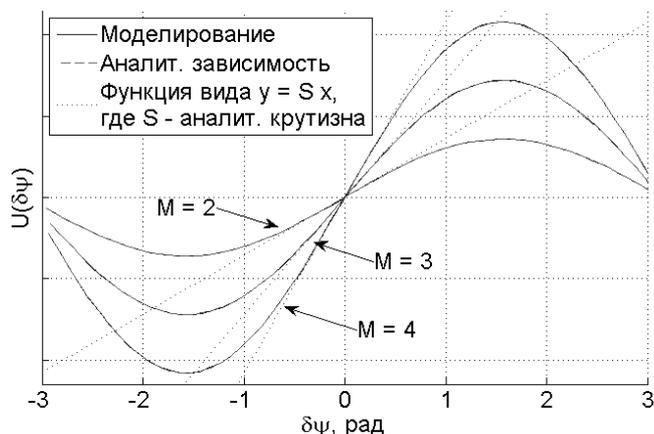


Рис. 5. Дискриминационная характеристика дискриминатора разности фаз в случае УНАП с 2, 3 и 4 антеннами

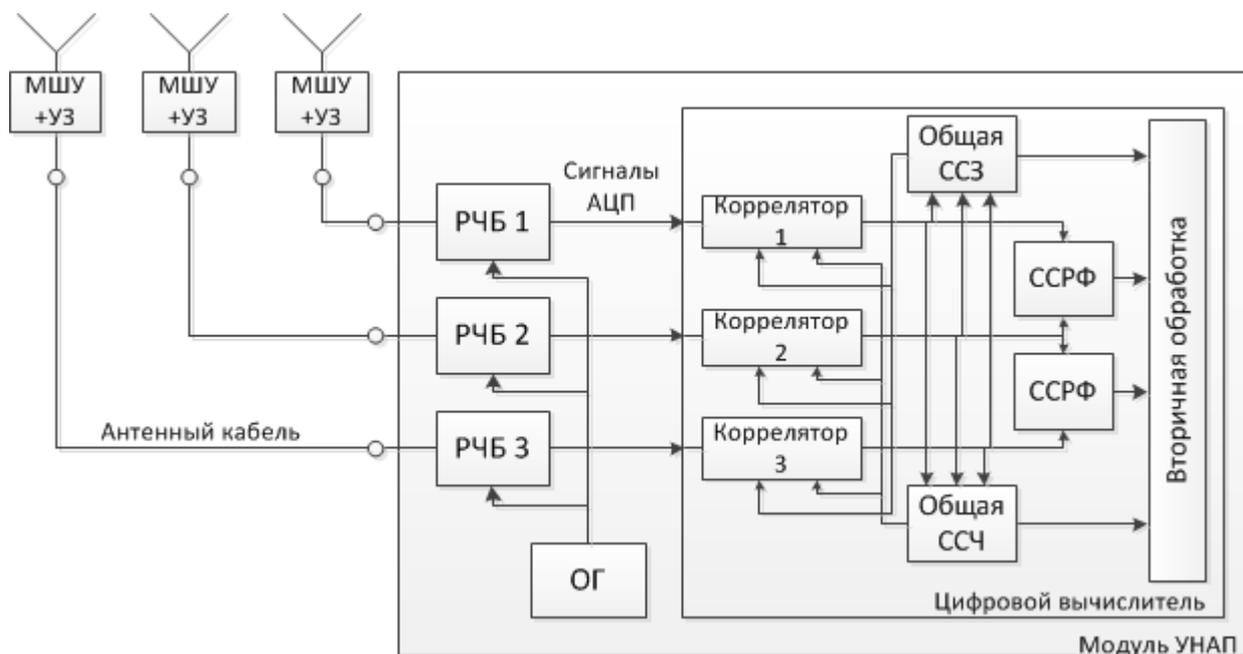


Рис. 6. Структурная схема УНАП, реализующей упрощенный квазиоптимальный алгоритм оценивания параметров сигналов

В третьей главе приводятся результаты моделирования алгоритмов обработки сигналов, как разработанных, так и известных ранее.

Проведено сравнение характеристик упрощенного квазиоптимального алгоритма с характеристиками ряда других алгоритмов, включая используемый в

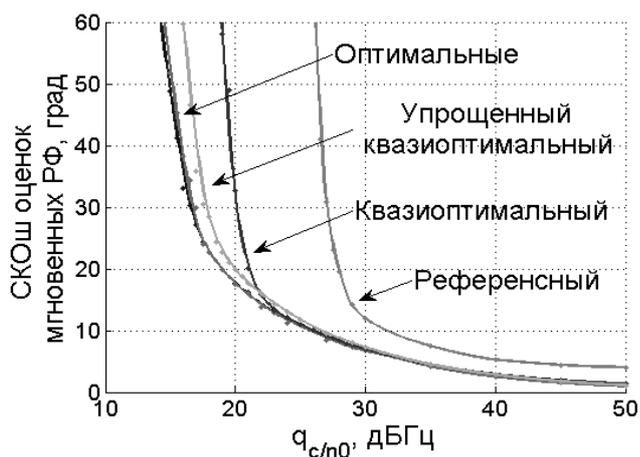


Рис. 7. Среднеквадратическая ошибка оценок РФ при средней динамике вращений

УНАП предыдущего поколения (названный референсным). Характеристики алгоритмов сравниваются с потенциальными, полученными по методике, описанной в гл. 1. Для примера на рис. 7 приведены зависимости среднеквадратической ошибки оценок РФ при средней динамике вращений.

Исследована чувствительность синтезированных и известных алгоритмов

обработки в УНАП. Результаты исследования приведены в табл. 3.1.

Исследована помехоустойчивость синтезированных и известных алгоритмов обработки в УНАП. Результаты исследования приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.1 Чувствительность алгоритма слежения за РФ, ДБГц

Тип алгоритма\Тип динамики	Низкая, 40 с	Средняя, 4 с	Высокая, 4 с
Оптимальный:			
- простая функция потерь	8	14	18
- квадратичная ф. потерь	10	14	18.5
Квазиоптимальный	18	19	23
Упрощ. квазиоптимальный	14	16	20
Референсный	27	27	27

Таблица 3.2 Помехоустойчивость алгоритма слежения за РФ, дБ

Тип алгоритма\Тип динамики	Низкая, 40 с	Средняя, 4 с	Высокая, 4 с
Оптимальный:			
- простая функция потерь	49.5	50.5	46
- квадратичная ф. потерь	49.5	50.5	46
Квазиоптимальный	47	47.5	41
Упрощ. квазиоптимальный	49.5	49.5	44
Референсный	42	44	44

Разработанный в диссертации упрощенный квазиоптимальный некогерентный алгоритм обработки реализован в УНАП, созданной в ОКР «Перспектива-С» в ОАО «НИИ космического приборостроения» (индекс изделия 14Ц830). Проведены натурные испытания данного изделия, схема которых приведена на рис.8.

В результате проведенных испытаний показано, что помехоустойчивость УНАП составляет 48 дБ, что согласуется с аналитическими результатами и

результатами моделирования. Данный уровень помехоустойчивости на 8 дБ выше, чем у предыдущего образца УНАП, использующего независимое слежение за фазами сигналов различных антенн с помощью широкополосных систем ФАП, с последующим нахождением оценки разности фаз как разности оценок фаз. Точность определения параметров угловой ориентации объекта в опытном образце УНАП примерно такая же, что и у предыдущего образца УНАП и составляет ~ 2-3 угловых минуты (СКО), что обусловлено наличием дополнительных источников погрешности.

В четвертой главе приводится методика и алгоритмы компенсации ошибок, вносимых неидентичностью характеристик радиочастотных блоков в оценки разностей фаз сигналов.

Предлагается система последовательных переключений радиочастотных блоков (см. рис. 9), при которых появляется возможность анализировать параметры сигналов при прохождении различных РЧБ.

Разработан алгоритм пересчета разностей фаз сигналов промежуточной частоты в разности фаз сигналов, получаемых с выходов антенн, на основе измеренных параметров неидентичности радиочастотных блоков. Проведена коррекция синтезированных в гл. 2 алгоритмов первичной обработки, с учетом производимых переключений, что позволяет

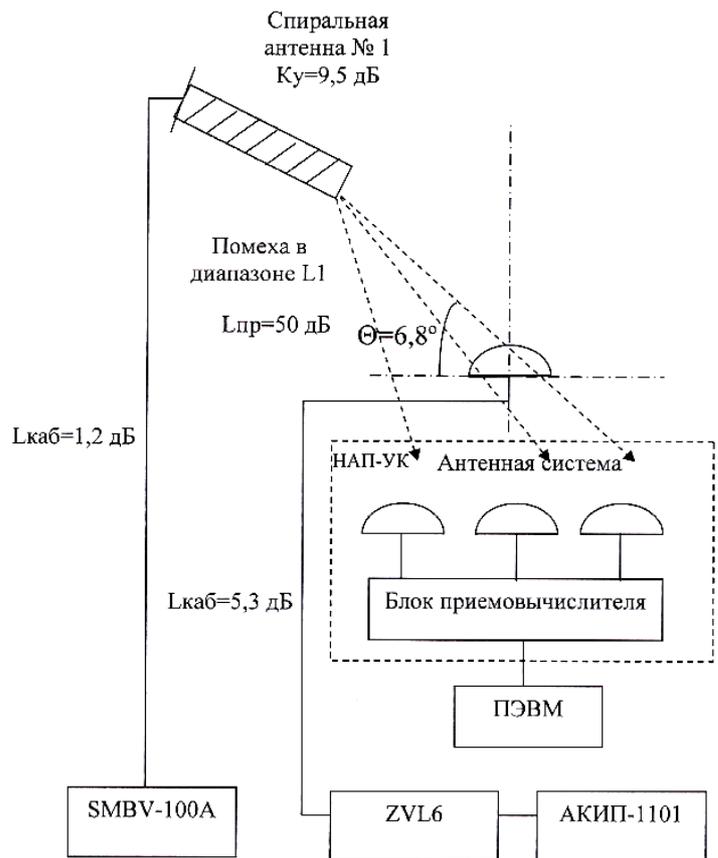


Рис. 8. Схема проведения испытаний

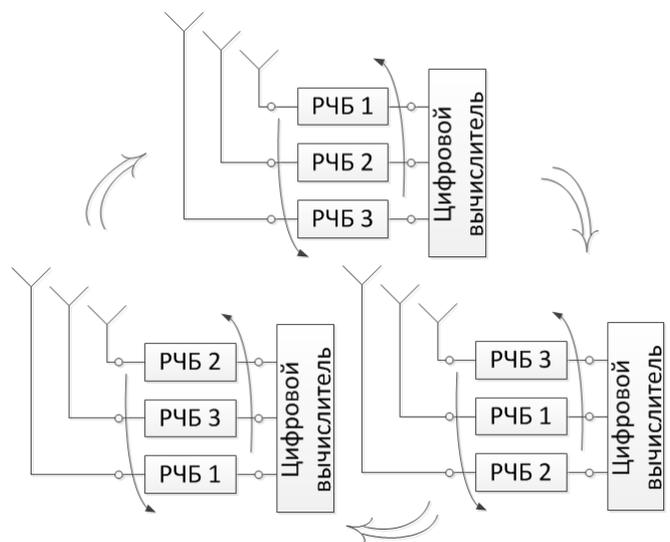


Рис. 9. Циклическое переключение РЧБ

оценивать параметры неидентичности радиочастотных блоков. Приведены результаты моделирования и натурных испытаний, подтверждающие работоспособность предложенного метода и иллюстрирующие его эффективность.

В **заключении** сформулированы основные научные и практические результаты работы.

В **Приложение 1** вынесены дополнительные иллюстрации, в **Приложении 2** изложены математические доказательства отдельных положений, используемых в работе. В **Приложении 3** – акты о внедрении результатов.

В рамках проведенного диссертационного исследования получены следующие **результаты и выводы**:

1. Предложена новая математическая модель описания сигналов, принимаемых угломерной навигационной аппаратурой потребителей в пространственно разнесенных точках, отличающаяся от известных разделением параметров на две группы, одна из которых характеризует поступательное движение объекта относительно спутника (задержка, частота, «общая» фаза), а вторая – характеризует вращательное движение объекта (разности фаз сигналов).

2. Впервые сформулирована постановка задачи некогерентной обработки сигналов промежуточной частоты в угломерной НАП.

3. Синтезирован квазиоптимальный (в гауссовом приближении) некогерентный алгоритм оценки задержки, частоты и разности фаз сигналов промежуточной частоты, принятых на множестве пространственно разнесенных точек. Алгоритм включает оптимальные дискриминаторы соответствующих параметров и комплексный сглаживающий фильтр.

4. Синтезированный квазиоптимальный некогерентный алгоритм обработки позволяет разработчику выбирать опорные параметры дискриминаторов. Это существенно упрощает коррелятор и снижает интенсивность обмена с ним.

5. Для синтезированных дискриминаторов разности фаз, частоты и задержки получены аналитические выражения для расчета дискриминационных характеристик и дисперсий шумов на выходе дискриминаторов.

6. Получены аналитические выражения для шумовой полосы дискретных следящих систем первого, второго и третьего порядков.

7. Разработана методика анализа потенциальных характеристик оценок параметров сигналов, основанная на численном решении уравнений Стратоновича.

8. Разработан ориентированный на практическую реализацию в УНАП упрощенный квазиоптимальный некогерентный алгоритм оценки разностей фаз, частоты и задержки сигналов промежуточной частоты. Данный алгоритм включает системы слежения за частотой, задержкой и набора систем слежения за разностями фаз. Он сопоставим по сложности с известными алгоритмами обработки, а его характеристики близки к характеристикам оптимальных алгоритмов. Он универсален и рекомендуется к применению в УНАП.

9. Разработаны имитационные модели для разработанных алгоритмов обработки сигналов в УНАП.

10. Моделирование показывает существенное превосходство синтезированного упрощенного квазиоптимального алгоритма над референсным (используемым в настоящее время для обработки сигналов в УНАП) по характеристикам помехоустойчивости, точности, чувствительности. Показано, что его применение позволяет повысить чувствительность УНАП на 7-17 дБ. При низкой динамике вращений помехоустойчивость УНАП повышается на 4-8 дБ (до значений около 50 дБ для ВТ сигналов ГЛОНАСС). От потенциальных характеристик чувствительности и помехоустойчивости он отстает на 2-5 дБ и 1-2 дБ соответственно.

11. Помехоустойчивость приемника зависит от направления прихода помехи. Существуют направления, при приходе с которых помехи существенно ослабляются.

12. На систему слежения за разностью фаз практически не влияет нестабильность опорного генератора. Выбор её полосы обусловлен только отношением сигнал/шум и динамикой вращательного движения. Слежение же за задержкой и частотой при низких отношениях сигнал/шум и высокой мощности помех возможно благодаря применению некогерентного режима работы.

13. Разработанный в диссертации упрощенный квазиоптимальный некогерентный алгоритм обработки сигналов УНАП реализован в опытном образце 14Ц830 ОАО «НИИ космического приборостроения». Проведены экспериментальные исследования данного образца УНАП, показавшие, что его помехоустой-

чивость составляет 48 дБ, что согласуется с аналитическими результатами, результатами моделирования и на 8 дБ выше, чем у существующих образцов УНАП.

14. Разработана методика компенсации неидентичности характеристик радиочастотных блоков, основанная на их циклическом переключении. Имитационным моделированием показано, что увеличение ошибок оценивания второй разности фаз, при использовании предложенного подхода, относительно потенциального уровня ошибок, при использовании идеальных идентичных радиочастотных блоков, оставляет около 10% по СКО.

Приведены результаты натурных испытаний опытного образца УНАП ОАО «НИИ космического приборостроения», реализующей созданные алгоритмы. Показано, что точность компенсации неидентичности радиочастотных блоков в измерениях вторых разностей фаз составляет около четверти миллиметра (0,5 градуса) при исходной ошибке около 1-2 см.

Резюме. Применение разработанных в диссертации алгоритмов обработки сигналов в угломерной НАП позволяет существенно повысить её помехоустойчивость и чувствительность, что можно характеризовать как достижения цели диссертационного исследования.

Публикации Основное содержание диссертационной работы изложено в двадцати одной печатной работе, среди которых девять статей (из которых шесть в научно-технических журналах, входящих в перечень Высшей аттестационной комиссии), четыре патента, три свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, а также тезисы пяти международных конференций. Материалы диссертации отражены в 4 научно-технических отчетах по НИР и ОКР.

1. **Перов, А. И., Корогодин, И. В., Лопатко, О. Е. Комбинированная когерентно-некогерентная система определения углов ориентации объекта по сигналам спутниковых радионавигационных систем // Радиотехника. — М.: Радиотехника, 2009. — № 7. — С. 88-98.**

2. **Корогодин, И. В., Перов, А. И. Синтез и анализ дискриминаторов разностей фаз сигналов, принимаемых на множестве пространственно разнесенных точек // Радиотехника. — М.: Радиотехника, 2010. — № 7. — С. 84-92.**

3. **Перов, А. И., Корогодин, И. В. Синтез и анализ алгоритмов оценивания мощности полезной и шумовой составляющих на выходе коррелятора // Радиотехника. — М.: Радиотехника, 2011. — № 7. — С. 76-82.**

4. Корогодин, И. В. Анализ влияния многолучевого распространения сигналов спутниковой радионавигационной системы на характеристики коррелятора навигационного приемника // Радиотехника. — М.: Радиотехника, 2011. — № 7. — С. 95-99
5. Перов, А. И., Корогодин, И. В. Синтез и анализ когерентно-некогерентного алгоритма приема сигналов в пространственно разнесенных точках в условиях многолучевости // Радиотехника. — М.: Радиотехника, 2012. — № 6. — С. 108-117.
6. Корогодин, И. В., Букреев, А. М. Компенсация разности фазовых набегов в радиочастотных блоках угломерной аппаратуры СРНС ГЛОНАСС // Радиотехника. — М.: Радиотехника, 2012. — № 6. — С. 140-147.
7. Измеритель разности фаз радиосигналов: патент на полезную модель № RU 84993 U1 Рос. Федерация, МПК G01R25/00 / Перов, А. И., Корогодин, И. В., опубл. 20.07.2009
8. Измеритель разности фаз радиосигналов: патент на изобретение № RU 2388001 C1 Рос. Федерация, МПК G01R25/00 / Перов, А. И., Корогодин, И. В., опубл. 27.04.2010
9. Цифровой приемник сигналов спутниковых радионавигационных систем: патент на полезную модель № RU 115079 U1 Рос. Федерация, МПК G01S19/13 / Перов, А. И., Корогодин, И. В., заявл. 25.10.2011, приоритет от 27.10.2011, опубл. 20.04.2012
10. Цифровой приемник сигналов спутниковых радионавигационных систем: патент на изобретение № RU 2467351 C1 Рос. Федерация, МПК G01S19/13 / Перов, А. И., Корогодин, И. В., заявл. 25.10.2011, приоритет от 25.10.2011, опубл. 20.11.2012
11. Перов, А. И., Корогодин, И. В. Оптимальное оценивание угла прихода сигнала с неизвестной начальной фазой двумя разнесенными приемниками // Радиотехнические тетради. — 2008. — № 37. — С. 57-61.
12. Перов, А. И., Корогодин, И. В. Синтез и анализ алгоритмов обработки сигналов в аппаратуре определения угловой ориентации объектов по сигналам СРНС // Радионавигационные технологии в приборостроении: Сборник материалов Научно-технических конференций за 2009-2010 г.г.(г. Туапсе). — М.: Лика, 2011. — С. 65-74.
13. Корогодин, И. В., Перов, А. И., Буркеев, А. М. Компенсация ошибки, вносимой многолучевостью в измерения фазы радионавигационного сигнала // Радионавигационные технологии в приборостроении: Сборник материалов Научно-технической конференции за 2011 г.(г. Туапсе). — М.: Лика, 2011. — С. 30.
14. Корогодин И. В., Перов А.И. Имитационная модель приемника, предназначенного для определения угловой ориентации объекта по сигналам СРНС. — РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2009612470 от 18.05.2009
15. Корогодин, И. В. Модель многолучевого распространения сигнала спутниковой радионавигационной системы при отражении от экрана конечных размеров. — РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2011617611 от 30.09.2011
16. Корогодин, И. В. Модель переходных процессов в идеальном дискретном корреляторе при учете полосы радиочастотной части приемника. — РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2011617612 от 30.09.2011

17. Корогодин, И. В., Перов, А. И. Оптимальное оценивание угла прихода сигнала двумя разнесенными приемниками // Сборник тезисов докладов конференции РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009. — Т. 1. — С. 117-118.

18. Корогодин, И. В., Перов, А. И. Синтез и анализ дискриминаторов разности фаз и доплеровского смещения частоты сигналов, принимаемых в пространственно разнесенных точках // Сборник тезисов докладов конференции РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА. — М.: Издательский дом МЭИ, 2010. — Т. 1. — С. 145-147.

19. Корогодин, И. В., Перов, А. И. Синтез частотных дискриминаторов квадратурных компонент // Сборник тезисов докладов конференции РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — Т. 1. — С. 140-142.

20. Корогодин И.В. Первичная обработка сигналов в устройстве определения угловой ориентации по сигналам СРНС // Радиолокация, навигация и связь: Сб. трудов междунар. конф. Воронеж, 2011.

21. Корогодин, И. В., Перов, А. И. Компенсация разности фазовых набегов в радиочастотных блоках угломерной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем // Сборник тезисов докладов конференции РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА. — М.: Издательский дом МЭИ, 2012. — Т. 1. — С. 135-136.

Электронная версия работы, а также препринты статей, информация о свидетельствах Роспатента и т.п., доступны на странице автора <http://www.srms.ru/wiki/Korogodin>