

ШАТИЛОВ Александр Юрьевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ОПТИМАЛЬНОЙ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ И ИНФОРМАЦИИ В
ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ НАВИГАЦИИ**

Специальность 05.12.14
Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем Московского энергетического института (технического университета) .

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
ПЕРОВ Александр Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ЕФИМЕНКО Валерий Сергеевич
кандидат технических наук, доцент
МАРКОВ Сергей Сергеевич

Ведущая организация: **Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт космического приборостроения» (ФГУП «НИИКП»), г. Москва**

Защита состоится **24 мая 2007 г. в 17 ч. 00 мин.** на заседании Диссертационного совета Д 212.157.05 при Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу: 115200, Москва, Красноказарменная ул., д.17., **аудитория А-402.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского энергетического института (технического университета).

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: **111250, Москва, Красноказарменная ул., д.14, Учёный совет МЭИ(ТУ)**

Автореферат разослан 23 апреля 2007 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.157.05.
кандидат технических наук, доцент

Т.И. КУРОЧКИНА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

На фоне общего технического прогресса существенно расширяется применение различных навигационных систем, что требует их непрерывного совершенствования. В ряде современных приложений навигационным системам предъявляются высокие требования по точности, помехозащищенности, надежности, непрерывности работы и другим показателям качества при высокой динамике движения потребителя. Таким приложениям соответствуют маневренные объекты военной техники: боевые самолёты и вертолёт, беспилотные летательные аппараты, крылатые ракеты, ракетные системы залпового огня, корректируемые артиллерийские снаряды (КАС) и авиабомбы, сухопутная мобильная техника. К этому же ряду приложений относятся гражданские системы управления навигации автотранспорта.

Важнейшее место среди навигационных систем занимают среднеорбитальные спутниковые радионавигационные системы (СРНС): отечественная глобальная навигационная система ГЛОНАСС, и американская система GPS (Global Positioning System). В перспективе значится развертывание европейской СРНС Galileo. Достоинствами данных СРНС являются: глобальность рабочей зоны; неограниченная пропускная способность; высокая точность измерения текущего времени, пространственных координат, вектора скорости и пространственной ориентации; низкая стоимость навигационной аппаратуры потребителя (НАП).

При создании новых навигационных систем широко используются достижения в области комплексирования СРНС с автономными нерадиотехническими системами, основными из которых в настоящее время являются инерциальные навигационные системы (ИНС). Каждая из указанных навигационных систем в отдельности не удовлетворяет всем требованиям, которые предъявляются к качеству измерений навигационных параметров подвижных объектов. В частности, СРНС не удовлетворяет наиболее важным требованиям помехоустойчивости¹, ИНС – требованиям точности. Комплексирование СРНС и ИНС должно способствовать объединению лучших свойств этих двух систем, позволив существенно повысить точность, помехоустойчивость, достоверность и непрерывность навигационных определений.

Таким образом, в настоящее время существует **актуальная научно-техническая проблема** совершенствования и разработки новых алгоритмов и методов обработки сигналов и информации в комплексированных инерциально-спутниковых навигационных системах (ИСНС).

Состояние вопроса

Общая теория статистического синтеза оптимальных, в т.ч. комплексных,

¹ Под помехоустойчивостью понимается способность приемника сигналов СРНС решать целевую задачу с заданными характеристиками при воздействии внешних помех.

алгоритмов оценивания информационных процессов разрабатывалась в работах А.Н. Колмогорова, Н.Винера, Р.Е. Калмана, Р.Л. Стратоновича. Заметный вклад в развитие этой теории в области радиотехнических систем внесли отечественные ученые Тихонов В.И., Харисов В.Н., Ярлыков С.М., Сосулин Ю.Г., а также американские ученые Сейдж Э.П., Мелс Дж. Методическая база по практическим вопросам синтеза комплексных СРНС/ИНС алгоритмов подробно разрабатывалась М.С. Груалом, Л.Р.Веиллом и А.П. Эндрюсом.

В настоящее время уже существует ряд серийно выпускаемых изделий ИСНС, например: ЛИНС-2000 (РПКБ, Россия), КомпаНав-2 (ООО «ТеКнол», Россия), LN-200G (Litton, США), SPAN (Novatel, США). Наличие готовых изделий ИСНС говорит о достаточной зрелости теоретической проработки вопросов комплексирования СРНС и ИНС. Однако в последнее десятилетие значительный рост производительности процессоров дал мощный толчок для разработки и реализации сложных высокоэффективных алгоритмов комплексной обработки навигационных сигналов и информации.

Существенную роль в развитии ИСНС сыграло появление в середине 1990-х годов микромеханических инерциальных датчиков (MEMS – Microelectromechanical systems). Благодаря их технологичности и малым габаритам они находят всё большее применение как чувствительные элементы бесплатформенных¹ инерциальных навигационных систем (БИНС), а также в составе ИСНС. Однако, погрешности этих датчиков имеют особую специфику, а их уровень относительно высок, что следует учитывать при создании новых алгоритмов.

Максимальный выигрыш от комплексирования различных навигационных датчиков достигается при решении задачи синтеза оптимальных алгоритмов обработки. В работе такой синтез проводится на основе теории оптимальной фильтрации (ТОФ), что даёт оптимальную структуру и характеристики системы комплексной обработки информации.

Таким образом, накопленный опыт разработки и использования ИСНС стимулируют создание новых более совершенных и технологичных типов этих устройств.

Цель работы — повышение точности, помехоустойчивости алгоритмов комплексной обработки сигналов и информации в ИСНС и повышение эффективности их применения в ряде новых приложений путем разработки *специальных* алгоритмов комплексной обработки сигналов и информации в ИСНС.

Решаемые задачи

1. Синтез *двухэтапного* алгоритма комплексной обработки сигналов и информации в ИСНС при использовании *некогерентного* режима слежения за сигналами СРНС.

2. Синтез *одноэтапного* алгоритма комплексной обработки сигналов и ин-

¹ Бесплатформенные ИНС – инерциальные навигационные системы, которые в отличие от традиционных ИНС, не имеют гиросtabilизированной платформы на карданном подвесе.

формации в ИСНС при использовании *некогерентного* режима слежения за сигналами СРНС.

3. Синтез *двухэтапного* алгоритма комплексной обработки сигналов и информации в ИСНС при использовании *когерентного* режима слежения за сигналами СРНС.

4. Синтез *одноэтапного* алгоритма комплексной обработки сигналов и информации в ИСНС при использовании *когерентного* режима слежения за сигналами СРНС.

5. Синтез алгоритмов комплексной первичной обработки сигналов СРНС в инерциально-спутниковой навигационной системе с учетом *применения ИСНС на борту вращающегося КАС*.

6. Синтез алгоритма комплексной вторичной обработки информации в ИСНС с учетом *применения ИСНС в составе угломерной аппаратуры*.

7. Создание программных и аппаратных средств для исследования характеристик алгоритмов по п.1-6.

8. Исследование характеристик алгоритмов по п.1-6.

Методы исследований

Перечисленные задачи решались методами теории оптимальной фильтрации, теории статистического анализа систем радиоавтоматики, а также методами имитационного моделирования, прикладного и системного программирования, методами конструирования цифровых устройств.

Научная новизна

1. Синтезирован оптимальный алгоритм комплексной обработки сигналов и информации в ИСНС для двухэтапного некогерентного режима работы приемника сигналов СРНС.

2. Синтезирован оптимальный алгоритм комплексной обработки сигналов и информации в ИСНС для одноэтапного некогерентного режима работы приемника сигналов СРНС.

3. Синтезирован оптимальный алгоритм комплексной обработки сигналов и информации в ИСНС для двухэтапного когерентного режима работы приемника сигналов СРНС.

4. Синтезирован оптимальный алгоритм комплексной обработки сигналов и информации в ИСНС для одноэтапного когерентного режима работы приемника сигналов СРНС.

5. Синтезированы оптимальные алгоритмы комплексной первичной обработки сигналов СРНС в ИСНС, используемой на борту вращающегося КАС.

6. Синтезирован алгоритм комплексной вторичной обработки информации в ИСНС, используемой в составе угломерной аппаратуры.

7. Разработан новый метод представления вектора оцениваемых координат (псевдокординат) в пространстве состояний, обеспечивающий повышение эффективности синтезированных алгоритмов обработки сигналов в одноэтапном когерентном режиме работы НАП.

8. Результаты исследований характеристик точности и помехоустойчивости разработанных новых комплексных алгоритмов обработки сигналов и информации в ИСНС.

Достоверность результатов проведенных исследований подтверждается достаточно точным совпадением расчетных оценок, результатов математического моделирования и экспериментальных результатов.

Апробация результатов работы

Результаты диссертации докладывались на Международных НТК студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, МЭИ, 2002 — 2006 гг.; НТК ФГУП «РНИИ космического приборостроения», Москва, 2003 г.; Международный симпозиум «Аэрокосмические приборные технологии», Санкт-Петербург, Государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2004 г.; Всероссийских НТК молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники», Красноярск, Красноярский гос. техн. университет, 2004 и 2005 гг.; Международная НТК «Радиолокация, радионавигация, связь», Воронеж, Воронежский гос. университет, Апрель 2005 г.; НТК «Радиооптические технологии в приборостроении», Сочи, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005 и 2006 гг.; Юбилейная НТК «Инновации в радиотехнических информационно-телекоммуникационных технологиях», Москва, МАИ, 2006 г.; научные семинары кафедры РТС МЭИ(ТУ).

Практическая значимость

1. Разработанные алгоритмы обработки сигналов и информации в ИСНС обеспечивают улучшение потребительских свойств (точности, помехоустойчивости) навигационной аппаратуры.

2. Разработаны программные средства, позволяющие оценивать характеристики комплексной НАП на этапах разработки и проектирования.

3. Создан макет программного приемника, позволяющего проводить экспериментальные исследования новых алгоритмов обработки сигналов и информации по реальным спутниковым сигналам.

Реализация результатов

Результаты диссертационной работы использовались и вошли в отчеты по НИР: «Рубикон», «Рудиментация» (головной исполнитель МЭИ(ТУ) г. Москва); «Левант» (головной исполнитель МГТУ им. И.Э. Баумана г. Москва) и внедрены в ФГУП «НИИ космического приборостроения», г. Москва в ОКР «Актив-Н» (вошли в эскизный проект) и ЗАО «НПО космического приборостроения», г. Москва в ОКР «Ориентир» (вошли в эскизный и технический проекты). Внедрение результатов диссертационной работы подтверждены соответствующими актами.

Личный вклад автора

Совместно с научным руководителем А.И. Перовым получены следующие результаты: постановка задачи синтеза алгоритмов комплексной первичной обработки информации при когерентном и некогерентном режиме слежения за

сигналами СРНС; постановка задачи, синтез и анализ оптимального двухэтапного алгоритма комплексной обработки сигналов и информации СРНС/ИНС при некогерентном режиме слежения за сигналами СРНС (раздел 1.1 диссертации); постановка задачи оптимальной комплексной обработки сигналов СРНС при когерентном режиме слежения по методу дополнительной переменной (МДП).

Создание аппаратного и программного обеспечения макета ИСНС для экспериментального исследования характеристик комплексных алгоритмов обработки информации СРНС/ИНС (Глава 4) было проведено вместе с Перовым А.А. и Болденковым Е.Н.

Остальная часть работы была выполнена автором лично.

Публикации

По результатам работы опубликовано 4 статьи в журнале «Радиотехника», 1 статья в журнале «Радиотехнические тетради», 5 докладов и 9 тезисов докладов в трудах конференций.

Положения, выносимые на защиту

1. Алгоритмы комплексной обработки информации в ИСНС при *некогерентном* режиме слежения за сигналами СРНС.
2. Алгоритмы комплексной обработки информации в ИСНС при *когерентном* режиме слежения за сигналами СРНС.
3. Алгоритмы комплексной обработки сигналов СРНС в бортовой навигационной аппаратуре КАС.
4. Алгоритм вторичной обработки информации СРНС/ИНС в угломерной аппаратуре потребителей.
5. Программные и аппаратные средства исследования алгоритмов по п. 1-4.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 83 наименований и 12 приложений. Основная часть работы изложена на 218 страницах, и содержит 11 таблиц и 77 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и основные задачи исследования, показана научная новизна и практическая ценность работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 изложены результаты синтеза и исследования характеристик алгоритмов комплексной обработки информации в ИСНС при *некогерентном* режиме работы НАП. В частности, методами теории оптимальной фильтрации (ТОФ) синтезирован *оптимальный двухэтапный* алгоритм комплексной обработки сигналов и информации в ИСНС при некогерентном режиме слежения за сигналами СРНС. Структурная схема устройства, реализующего алгоритм приведена на рис. 1. При синтезе алгоритма ставилась задача оценивания вектора состояния $\Lambda = |\mathbf{x}^T \ D' \ \mathbf{v}^T \ V' \ \mathbf{a}^T \ \Psi^T \ \chi^T|^T$ (где \mathbf{x} – вектор координат

потребителя, \mathbf{v} – вектор скорости, \mathbf{a} – вектор ускорения, Ψ – вектор погрешностей счисления углов ориентации в ИНС, χ – вектор скорости изменения Ψ , а также векторов состояния $\mathbf{R}^\nu = [R^\nu \ V^\nu \ a^\nu]^\top$ (ν – номер принимаемого сигнала СРНС, R – псевдодальность, V – псевдоскорость, a – радиальное ускорение). Требование оценивания \mathbf{R}^ν в постановке задачи привело к двухэтапной структуре алгоритма.

Особенностями алгоритма являются: 1) в блок вторичной обработки информации поступают не оценки $\hat{\mathbf{R}}_{n,k}^\nu$, сформированные по всем наблюдениям, а оценки $\check{\mathbf{R}}_{n,k}^\nu$, сформированные по наблюдениям лишь на данном тактовом интервале; 2) наличие обратных связей по первичным навигационным параметрам от блока вторичной обработки информации до блоков первичной обработки информации; 3) наличие дополнительного фильтра в каждом канале первичной обработки.

Алгоритм позволил достигнуть точности оценивания скорости потребителя 0,7 м/с (ср. сф. ошибка) и помехоустойчивости $J/S = 44$ дБ при использовании ИНС средней и высокой точности, что, соответственно, в 3,5 раза и на 8 дБ лучше точности и помехоустойчивости известных некогерентных алгоритмов без комплексирования. Также, алгоритм обеспечивает оценки углов ориентации потребителя с точностью 4,5 угл. мин. (ср. сф. ошибка) при использовании ИНС средней точности, тогда как в автономном режиме эта же ИНС дает нарастающую погрешность счисления ориентации со скоростью роста около $3^\circ/\text{ч}$.

Синтезирован *упрощенный двухэтапный* алгоритм комплексной обработки сигналов и информации в ИНС при *некогерентном* режиме слежения за сигналами СРНС. Упрощения заключаются в сокращении числа информационных связей по сравнению с оптимальным алгоритмом и в отдельном синтезе блока первичной и блока вторичной обработки информации. При этом в структурной схеме рис. 1 исключается блок «Фильтр 2», в блок вторичной обработки информации поступают только оценки псевдодальностей R^ν и псевдоскоростей V^ν , а не полных векторов состояния \mathbf{R}^ν , из блока пересчета в фильтр первичной обработки поступают только оценки радиального ускорения a^ν .

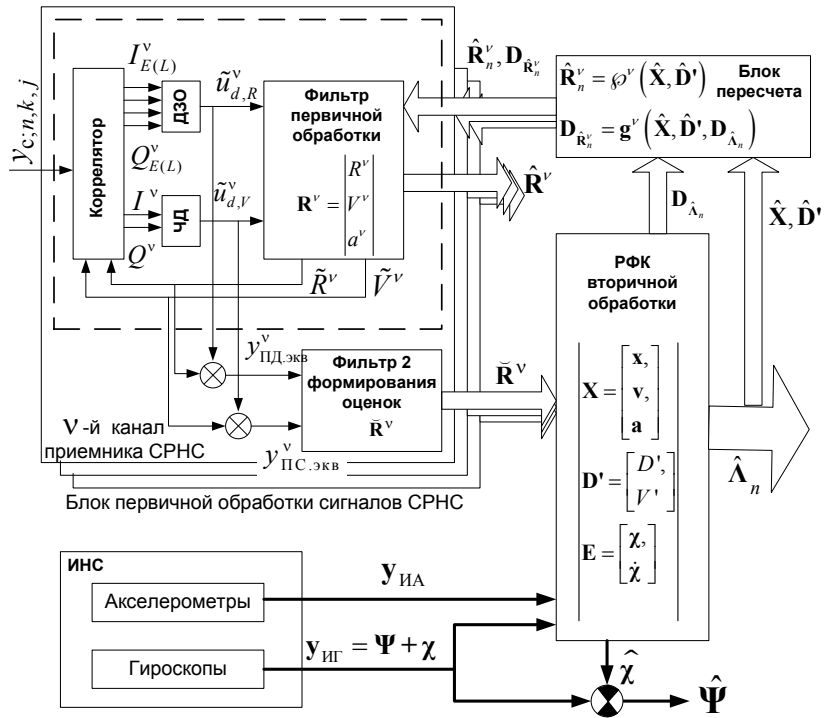


Рис. 1. Схема оптимального двухэтапного алгоритма обработки информации в ИНС. ЧД – частотный дискриминатор, ДЗО – дискриминатор задержки огибающей, РФК – расширенный фильтр Калмана.

Алгоритм отличается от известных некогерентных двухэтапных комплексных алгоритмов тем, что комплексная обработка сигналов и информации осуществляется как на первичном, так и на вторичном уровнях. Алгоритм позволил достигнуть характеристик, близких к характеристикам оптимального алгоритма с использованием ИНС высокой точности, при существенном сокращении информационных связей. Однако, с использованием ИНС низкой точности, характеристики упрощенного алгоритма оказываются существенно хуже и приближаются к характеристикам алгоритмов без комплексирования.

В упрощенном алгоритме выявлен и исследован эффект нестабильности, который проявляется в нарастании ошибок оценивания навигационных параметров при использовании ИНС низкой точности. Показано, что для избежания этого эффекта необходимо увеличивать полосы пропускания следящих систем в блоке первичной обработки сигналов.

Синтезирован *одноэтапный* алгоритм комплексной обработки сигналов и информации в ИСНС при некогерентном режиме слежения за сигналами СРНС. Структурная схема данного алгоритма изображена на рис. 2.

Проведенный анализ погрешностей ИНС показал необходимость при синтезе алгоритма включать в вектор состояния потребителя погрешности угловой ориентации для повышения эффективности комплексной обработки информации. Оценивание этих погрешностей позволило получить высокую точность определения ориентации потребителя (1,5...150 угл. мин.), причем ошибки ориентации не нарастают, как в автономной ИНС, а остаются в фиксированных пределах.

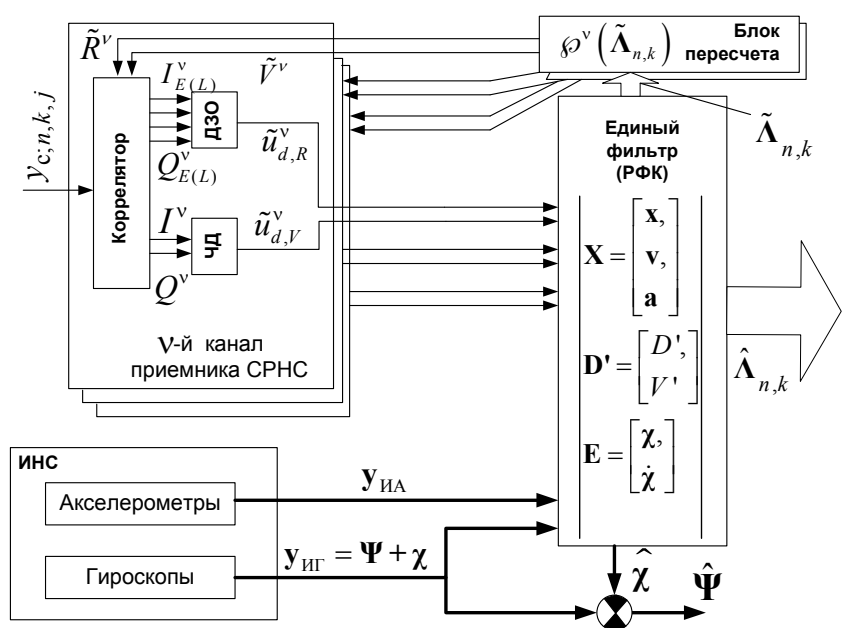


Рис. 2. Схема оптимального одноэтапного алгоритма обработки информации в ИСНС. ЧД – частотный дискриминатор, ДЗО – дискриминатор задержки огибающей, РФК – расширенный фильтр Калмана.

Установлено, что ограничение помехоустойчивости некогерентного комплексного алгоритма первичной обработки сигналов СРНС обусловлено работой контура слежения за задержкой. При этом даже наилучшие характеристики ИНС не обеспечивают возможности сужения шумовой полосы этого контура до величин менее 0,02 Гц, что и ограничивает помехоустойчивость всей системы. Это отличается от известных результатов для когерентных алгоритмов, где наименее помехоустойчивым оказывается контур слежения за фазой сигнала.

Таблица 1. Сравнительные характеристики точности и помехоустойчивости синтезированных некогерентных алгоритмов.

Алгоритм	ССФО оценки координат, $\overline{\varepsilon_{сф,x}}$, м	ССФО оценки скорости, $\overline{\varepsilon_{сф,V}}$, м/с	ССФО оценки углов ориентации, $\overline{\varepsilon_{сф,\Psi}}$, мин	Помехоустойчивость J/S, дБ
Без комплексирования	5	4,7	Углы не определяются.	36
Оптимальный двухэтапный	5	1,3	23	40
Упрощенный двухэтапный	5	2,5	150	36
Одноэтапный	4	1,1	22	42

Установлено, что в области всех возможных значений точности реальных ИНС помехоустойчивость некогерентных алгоритмов комплексной обработки информации меняется слабо (на 2 дБ). В ещё меньшей степени помехоустойчивость зависит от динамики уходов частоты опорного генератора, что является серьезным отличием от известных результатов, полученных для когерентных систем, в которых динамика опорного генератора существенно влияет на помехоустойчивость.

Описана структура созданной универсальной имитационной модели ИСНС. Модель написана в виде программного обеспечения для ПК на языке MATLAB. Структурная схема модели приведена на рис. 3. Данная модель позволила определить характеристики точности и помехоустойчивости синтезированных алгоритмов, исследовать их свойства.

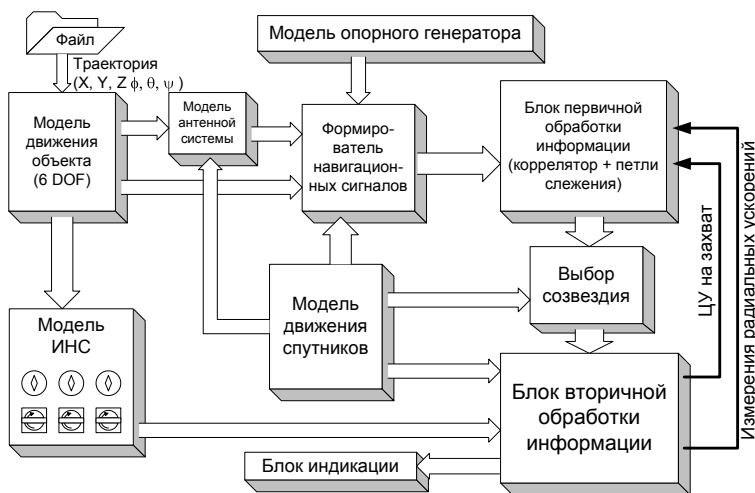


Рис. 3. Обобщенная схема имитационной модели ИСНС. В алгоритме достигнуто повышение помехоустойчивости на 7 дБ, точности оценивания фазы в 2–3 раза и псевдоскорости в 10 раз по сравнению с вариантом без комплексирования.

Проведенный теоретический анализ синтезированного комплексного алгоритма системы ФАП показал, что при использовании наилучших (в смысле кратковременной нестабильности) опорных генераторов и «идеальной» ИНС возможно сужение шумовой полосы до 2 Гц. Из полученных данных следует,

В главе 2 изложены результаты синтеза и исследования алгоритмов комплексной обработки информации в ИСНС при когерентном режиме работы НАП.

Синтезирован комплексный алгоритм системы ФАП для когерентного режима слежения за сигналами в НАП СРНС, который отличается от известных обработкой дополнительных измерений радиального ускорения.

В главе 2 изложены результаты синтеза и исследования алгоритмов комплексной обработки информации в ИСНС при когерентном режиме работы НАП. Синтезирован комплексный алгоритм системы ФАП для когерентного режима слежения за сигналами в НАП СРНС, который отличается от известных обработкой дополнительных измерений радиального ускорения.

что потенциально достижимый выигрыш в помехоустойчивости для динамич- ных объектов (5g) составляет 12 дБ. Установлено, что из-за влияния опорного генератора, полоса ФАП (а следовательно и помехоустойчивость) оказывает- ся нечувствительной к точности радиального ускорения от ИНС, если СКО ошибок не превосходит 1 м/с^2 при темпе обработки $T = 1 \text{ мс}$.

Синтезирован *упрощенный двухэтапный* алгоритм комплексной обработ- ки информации в ИСНС при *когерентном* режиме работы НАП, особенностями которого являются ориентированность на перспективные БИНС и простота реал- изации (благодаря существенному сокращению числа информационных связей между блоками первичной и вторичной обработки). В отличие от аналогично- го некогерентного алгоритма он стабильно работает даже при использовании БИНС низкой точности. При этом достигается повышение

помехоустойчивости на 5 дБ по сравнению с алгоритмами без комплексирования, повыше- ние точности оценивания скорости потребителя с 0,07 до 0,007 м/с и точность оценивания уг- ловой ориентации потребителя 4 угл. мин.

Синтезирован комплексный *одноэтапный* алгоритм обработ- ки информации в ИСНС при *когерентном* режиме слежения за сигналами СРНС по мето- ду дополнительной переменной (МДП). Структурная схема ал- горитма приведена на рис. 4. Особенностью алгоритма являет- ся более точный метод дискрет- ного интегрирования уравнений для экстраполяции фаз принимаемых сигналов, который дается уравнением

$$\varphi_{i,k} = \varphi_{i,k-1} + \frac{T}{2} \left[\mathbf{r}_{i,k-1}^T \cdot (\mathbf{V}_{i,k-1} - \mathbf{V}_{k-1}) + \mathbf{r}_{i,k}^T \cdot (\mathbf{V}_{i,k} - \mathbf{V}_{k-1} - \mathbf{A}_{k-1}T) \right] - V'_{k-1}T,$$

где $\varphi_{i,k}$ – экстраполируемая фаза сигнала СРНС; k – номер отсчета; i – но- мер сигнала спутника СРНС; \mathbf{r} – вектор направляющих косинусов на данный спутник; \mathbf{V}_{k-1} – вектор скорости потребителя, $\mathbf{V}_{i,k-1}$ – вектор скорости спут- ника; V'_k – смещение частоты опорного генератора в единицах скорости; T – шаг дискретизации по времени. Это позволило устранить проблему нарастания ошибок оценивания координат на длительных интервалах времени.

В синтезированном алгоритме достигается точность оценивания коорди- нат 2 см, скорости - 0,004 м/с, углов ориентации – 4 угл. мин, повышение

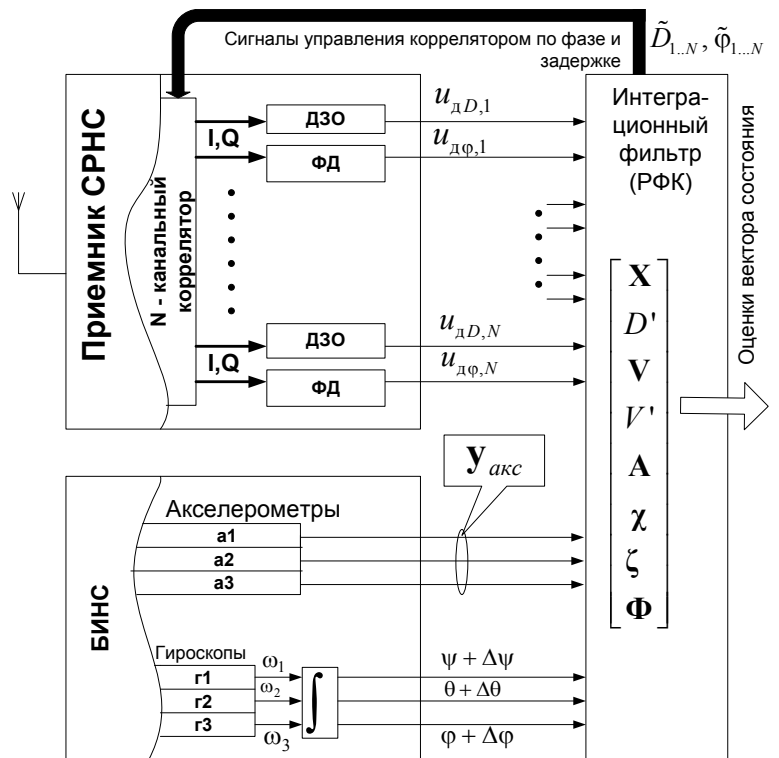


Рис. 4. Схема одноэтапного когерентного алгоритма комплексной обработки информации в ИСНС по принципу МДП.

помехоустойчивости на 5 дБ при комплексировании с ИНС низкой точности.

Разработан, теоретически обоснован и проверен на модели новый метод, обозначенный в работе как «метод псевдокоординат». Суть метода заключается во введении эквивалентного вектора псевдокоординат \mathbf{X}^{Π} , оцениваемого исключительно по фазовым наблюдениям. В работе доказано, что \mathbf{X}^{Π} отличается от вектора истинных координат \mathbf{X} на *постоянный* вектор, норма которого не превышает 10...20 м. В данном методе множество фаз наблюдаемых сигналов сводится к трем эквивалентным координатам, что позволяет существенно сокращать размер вектора состояния при синтезе одноэтапных когерентных алгоритмов обработки.

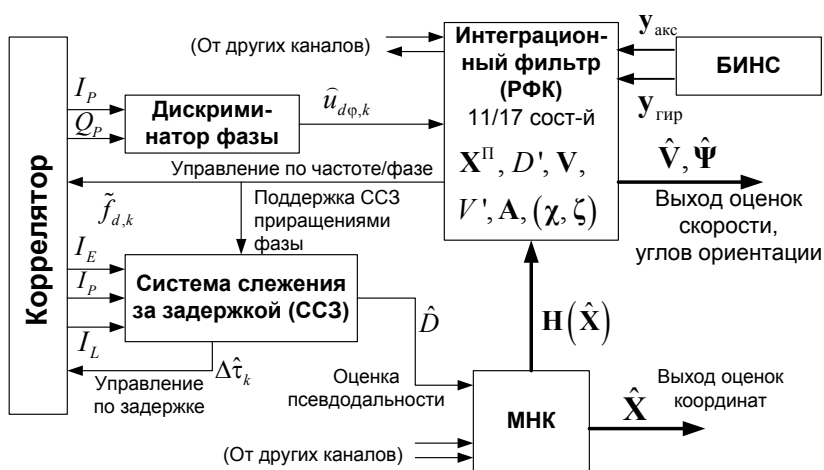


Рис. 5. Схема комбинированного одноэтапно-двухэтапного алгоритма обработки информации при когерентном режиме слежения за сигналами.

Синтезирован *модифицированный одноэтапно-двухэтапный* алгоритм комплексной обработки информации в ИСНС при *когерентном* режиме работы НАП, который отличается от известных тем, что использует описанный выше метод псевдокоординат вместо МДП. При этом вектор скорости потребителя оценивается по одноэтапной схеме, а координаты – по

двухэтапной. Структурная схема данного алгоритма приведена на рис. 5.

В синтезированном алгоритме достигается сокращение размера вектора состояния с 29 до 17, что существенно уменьшает требуемые вычислительные затраты. При этом помехоустойчивость и точность оценивания скорости и углов ориентации, оказывается такая же, как в одноэтапном алгоритме по методу дополнительной переменной.

Таблица 2. Сравнительные характеристики когерентных алгоритмов.

Алгоритм →	Алгоритмы без МДП				Алгоритмы с МДП			
	Двухэтапные		Одноэтапные		Двухэтапные		Одноэтапные	
	Без ИНС	С ИНС	Без ИНС	С ИНС	Без ИНС	С ИНС	Без ИНС	С ИНС
↓Характеристика↓								
Точность координат (ССФО), м	0,3	0,3	0,3	0,3	0,04	0,04	0,02	0,02
Точность скорости (ССФО), м/с	0,07	0,006	0,05	0,003	0,05	0,004	0,05	0,003
Точность ориентации (ССФО), угл. мин	-	0,8	-	0,8	-	0,8	-	0,8
Помехоустойчивость, J/S дБ	30	35	33	37	30	35	33	37

Методом математического моделирования проведены исследования характеристик синтезированных когерентных алгоритмов комплексной обработки информации в ИСНС. Основные характеристики приведены в табл. 2. Данные таблицы справедливы при следующих условиях: отношение мощности входного сигнала СРНС к спектральной плотности шума приемника $q_{c/n_0} = 40$ дБГц; геометрический фактор $K_r = 1,5 \dots 2,5$; погрешность акселерометров ИНС $0,06$ м/с²; дрейв гироскопов ИНС 80 °/ч; среднеквадратичное ускорение потребителя $5g$; спектральная плотность фазовых шумов опорного генератора -90 дБс/Гц; тип сигналов СРНС – ГЛОНАСС СТ.

В главе 3 изложены результаты синтеза алгоритмов комплексной обработки информации в ИСНС для особых приложений.

Методами ТОФ проведен синтез алгоритмов комплексной фильтрации для систем слежения за *фазой и частотой* сигнала СРНС, предназначенных для работы в составе бортовой навигационной аппаратуры *вращающегося снаряда*. Синтезированные алгоритмы решают проблему слежения за сигналом СРНС при интенсивном вращении фазового центра приемной антенны. Комплексная обработка информации в обоих алгоритмах заключается в использовании дополнительных измерений от осевого гироскопа. Структурная схема, реализующая алгоритм слежения за *фазой* сигнала приведена на рис. 6.

Схема отличается от известных систем ФАП наличием дополнительного контура компенсации углового вращения. Показано, что алгоритм обеспечивает слежение за фазой сигнала СРНС при вращении фазового центра приемной антенны с частотой более 15 Гц, тогда как в известных алгоритмах слежение не обеспечивается ни при какой частоте вращения.

Структурная схема, реализующая алгоритм слежения за *частотой* сигнала аналогична схеме рис. 6. Показано, что синтезированный алгоритм слежения работает без срывов при вращении фазового центра антенны с любой реализуемой угловой скоростью, тогда

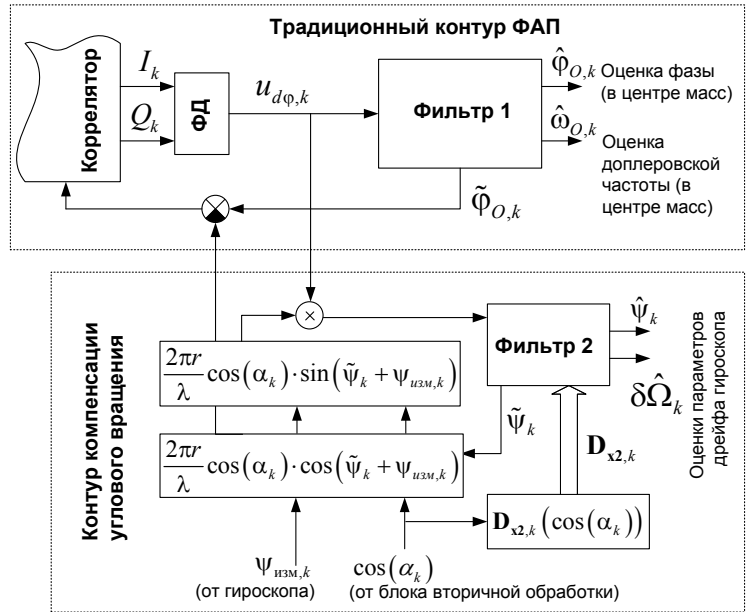


Рис. 6. Структурная схема алгоритма слежения за фазой сигнала СРНС с учетом вращения фазового центра приемной антенны. ФД – фазовый дискриминатор.

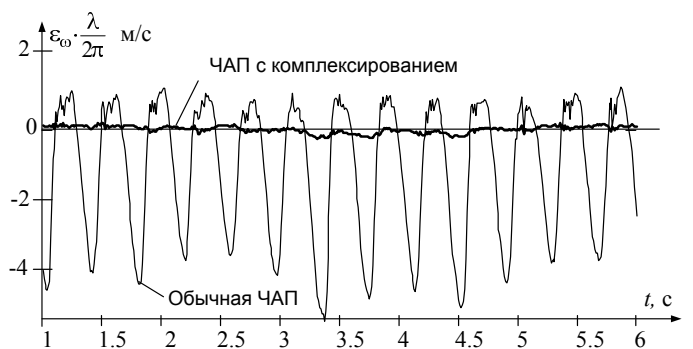


Рис. 7. Реализации ошибок оценивания частоты сигнала, приведенных к размерности радиальной скорости. Частота вращения антенны 2,5 Гц.

как в традиционных алгоритмах системы ЧАП слежение за частотой сигнала обеспечивается только при угловых скоростях вращения до 14 Гц. При угловых скоростях вращения менее 14 Гц синтезированный алгоритм дает точность оценивания частоты примерно в 10 раз лучше известных алгоритмов (рис. 7).

Предложен подход к синтезу алгоритмов обработки сигналов СРНС в бортовой навигационной аппаратуре снаряда, основанный на использовании априорных данных расчетной траектории полёта. На основе данного подхода синтезирован новый алгоритм системы слежения за фазой сигнала СРНС, который может рассматриваться как альтернатива алгоритмам комплексирования. Алгоритм отличается от известных алгоритмов ФАП обработкой дополнительной информации о расчетных значениях доплеровской частоты сигнала. Показано, что данный алгоритм обеспечивает повышение помехоустойчивости бортовой НАП СРНС на 4 дБ по сравнению с известными алгоритмами без комплексирования. Достоинством данного алгоритма является то, что он не требует наличия в составе НАП блока ИНС.

Разработана структурная схема обработки информации в бортовой НАП при использовании данных расчетной траектории (рис. 8).

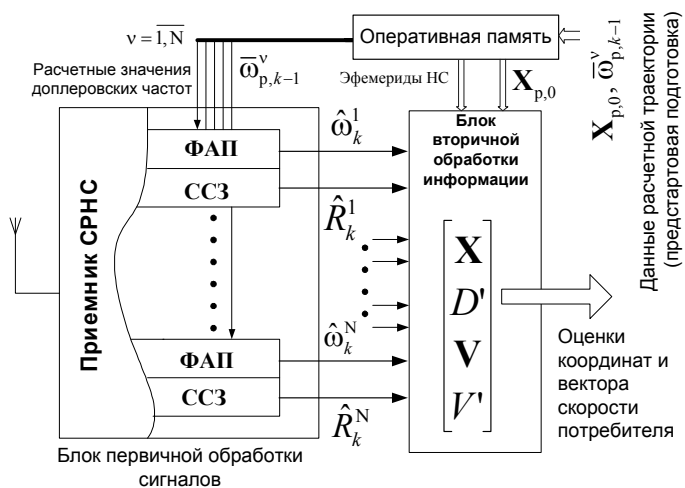


Рис. 8. Структурная схема алгоритма обработки информации в бортовой НАП при использовании данных расчетной траектории.

использованием измерений от гироскопов бесплатформенной ИНС. Для представления ориентации потребителя использовался математический аппарат кватернионов, что позволило относительно просто записать уравнения эволюции кватерниона вращения \mathbf{q} между системой координат, связанной с объектом и геоцентрической системой координат, связанной с Землей:

$$\mathbf{q}_k = \Delta \mathbf{m}^* \otimes \mathbf{q}_{k-1} \otimes \Delta \lambda (\omega_{b,k}),$$

где $\Delta \mathbf{m}^*$ – кватернион малого вращения, учитывающий поворот Земли за один такт работы; $\Delta \lambda$ – кватернион малого вращения, учитывающий поворот объекта относительно инерциальной системы координат за один такт работы; $\omega_{b,k}$ – вектор угловых скоростей инерциальной системы координат относительно

На схеме рис.8 данные расчетной траектории и расчетные значения доплеровских частот спутниковых сигналов для каждого момента времени заранее закладываются в оперативную память бортового вычислителя и эквивалентны информации от ИНС.

Рассмотрена задача комплексирования устройства определения угловой ориентации объекта (УОО), построенного на базе 4-х приемников сигналов СРНС. Синтезирован алгоритм комплексной вторичной обработки информации в УОО с использованием

системы координат объекта. Это упростило уравнения экстраполяции вектора состояния по сравнению со случаем представления ориентации потребителя углами Эйлера.

В алгоритме оценивается вектор состояния

$$\mathbf{x} = \left[\mathbf{q}^T \quad \boldsymbol{\omega}_b^T \quad \mathbf{b}^T \quad \vec{\mathbf{M}}^T \right]^T,$$

где \mathbf{b} – вектор смещений нуля гироскопов; $\vec{\mathbf{M}}$ – векторная запись (по столбцам) матрицы погрешностей масштабных коэффициентов и перекосов осей гироскопов.

Особенностью синтезированного алгоритма является учет погрешностей перекосов осей и масштабных коэффициентов бесплатформенных гироскопов, что особенно актуально в случае применения гироскопов низкой точности типа MEMS.

Синтезированный алгоритм позволил решить задачу достижения высокой точности оценивания углов ориентации потребителя (ср. сф. ошибка 2 угл. мин. – см. рис. 9) при высокой угловой динамике (макс. угловое ускорение до 14 рад/с²), что на порядок лучше автономной угломерной НАП СРНС. Кроме того, оценивание в алгоритме погрешностей масштабных коэффициентов и перекосов позволило достигнуть низкой скорости нарастания ошибок ориентации (около 24°/ч) при пропадании сигнала от СРНС.

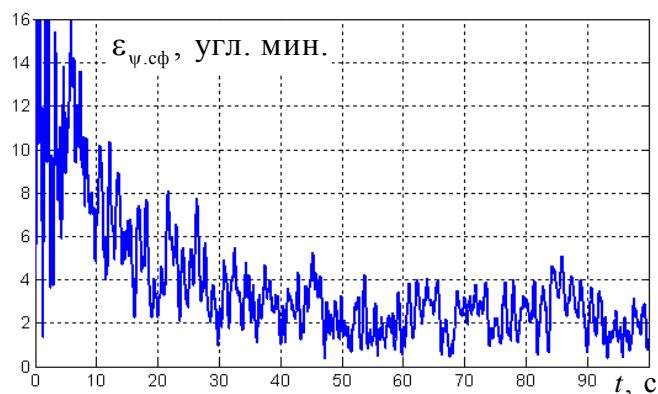


Рис. 9. Реализация мгновенной сферической ошибки оценивания углов ориентации.

Особенно эффективным алгоритм оказывается при использовании низкокачественных гироскопов типа MEMS, с которыми и были получены указанные характеристики.

В главе 4 изложена структура аппаратной и программной части созданного макета ИСНС. Приведены результаты экспериментального исследования когерентного двухэтапного алгоритма комплексной обработки информации в ИСНС, полученные на данном макете.

Впервые в России создан макет ИСНС на основе программного приемника (ПП) сигналов СРНС GPS, комплексированного с БИНС низкой точности и использующего асинхронный режим работы коррелятора. Структурная схема макета приведена на рис. 10.

Обработка информации в персональном компьютере (ПК) и комплексирование с БИНС отличает данный макет от аналогичных российских разработок, в которых для этого применяется специализированный сигнальный процессор. Для макета разработано специальное программное обеспечение (ПО),

в том числе для алгоритма комплексной обработки сигналов и информации СРНС/ИНС. Создание такого макета позволило провести экспериментальные исследования разработанных комплексных алгоритмов обработки информации в ИНС не прибегая к большим финансовым затратам и в относительно короткие сроки.

Проведенные экспериментальные исследования *двухэтапного когерентного* алгоритма комплексной обработки информации в ИНС показали его реализуемость в реальном времени и работоспособность. Получено подтверждение повышения

точности оценивания скорости в 10 раз, что соответствует результатам моделирования (табл. 2). Экспериментально подобрано минимальное значение полосы ФАП для режима с комплексированием (≈ 5 Гц), при котором ошибки оценивания скорости потребителя минимальны. Это обеспечивает повышение помехоустойчивости на 6-7 дБ по сравнению автономной ФАП (с полосой ≈ 20 Гц).

В заключении перечисляются основные научные и практические результаты диссертационной работы.

1. Синтезирован *двухэтапный* алгоритм комплексной обработки сигналов и информации в ИНС при *некогерентном* режиме работы НАП, который обеспечивает точность оценивания скорости потребителя 0,7 м/с (ср. сф. ошибка) и помехоустойчивости $J/S = 44$ дБ при использовании ИНС средней и высокой точности, что, соответственно, в 3,5 раза и на 8 дБ лучше точности и помехоустойчивости известных некогерентных алгоритмов без комплексирования. Также, алгоритм формирует оценки углов ориентации потребителя с точностью 4,5 угл. мин. (ср. сф. ошибка) при использовании ИНС средней точности.

2. Синтезирован *упрощенный двухэтапный* алгоритм комплексной обработки сигналов и информации в ИНС при *некогерентном* режиме работы НАП, в котором при использовании ИНС высокой точности достигаются характеристики, близкие к характеристикам оптимального алгоритма по п.1. Однако при использовании ИНС низкой точности характеристики оказываются существенно хуже и приближаются к характеристикам алгоритмов без комплексирования.

3. Впервые синтезирован *одноэтапный* алгоритм с комплексной обработкой сигналов и информации при *некогерентном* режиме работы НАП. Алгоритм имеет характеристики, близкие и даже незначительно превосходящие характеристики алгоритма п.1, однако отличается большей вычислительной сложностью.

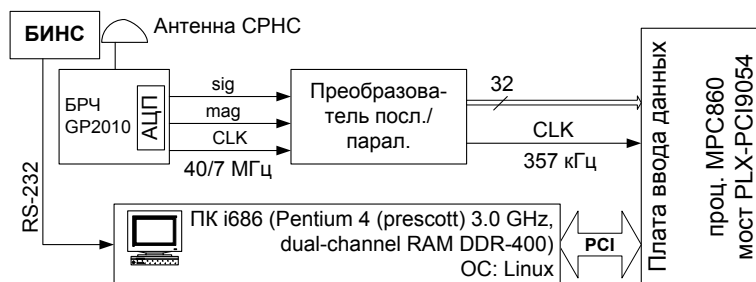


Рис. 10. Структурная схема макета ИНС.

4. Синтезирован комплексный алгоритм *ФАП* для *когерентного* режима слежения за сигналами в НАП СРНС, который обеспечивает повышение помехоустойчивости на 7 дБ, точности оценивания фазы в 2–3 раза и псевдоскорости в 10 раз по сравнению с известными алгоритмами.

5. Синтезирован *упрощенный двухэтапный* алгоритм комплексной обработки информации в ИСНС при *когерентном* режиме работы НАП, в котором даже при использовании ИНС низкой точности достигается повышение помехоустойчивости на 5 дБ по сравнению с алгоритмами без комплексирования, повышение точности оценивания скорости потребителя с 0,07 до 0,007 м/с и точность оценивания угловой ориентации потребителя 4 угл. мин.

6. Синтезирован комплексный *одноэтапный* алгоритм обработки информации в ИСНС при *когерентном* режиме работы НАП по методу дополнительной переменной и с более точным алгоритмом интегрирования в дискретном времени уравнений для экстраполяции фаз принимаемых сигналов. Это позволило устранить проблему нарастания ошибок оценивания координат на длительных интервалах времени. В синтезированном алгоритме достигается точность оценивания координат 2 см, скорости — 0,004 м/с, углов ориентации — 4 угл. мин., повышение помехоустойчивости на 5 дБ при комплексировании с ИНС низкой точности.

7. Разработан, теоретически обоснован и проверен на модели новый метод («метод псевдокоординат»), предлагающий сведение множества фаз наблюдаемых сигналов СРНС к трем эквивалентным координатам. Применение метода существенно сокращает размерность вектора состояния при синтезе одноэтапных когерентных алгоритмов обработки.

8. Синтезирован *модифицированный одноэтапно-двухэтапный* алгоритм комплексной обработки информации в ИСНС при *когерентном* режиме работы НАП, в котором достигается сокращение размера вектора состояния с 29 до 17, что существенно уменьшает вычислительную сложность. При этом помехоустойчивость и точность оценивания скорости и углов ориентации, оказывается такая же как в алгоритме п. 4.

9. Проведен синтез алгоритмов комплексных фильтров для *систем слежения за фазой и частотой* сигнала СРНС, предназначенных для работы в составе бортовой навигационной аппаратуры *вращающегося снаряда*. Алгоритмы отличаются от известных систем ФАП и ЧАП наличием дополнительного контура компенсации углового вращения. Синтезированные алгоритмы решают проблему слежения за сигналами СРНС при частотах вращения фазового центра приемной антенны, расположенной на боковой поверхности снаряда, более 15 Гц.

10. Синтезирован новый алгоритм обработки сигналов СРНС для применения в бортовой навигационной аппаратуре *артиллерийских снарядов*. При синтезе алгоритма применялся подход, основанный на *использовании данных о расчетной траектории* полёта. Данный алгоритм является альтернативой

комплексированию и позволяет повысить помехоустойчивость бортовой НАП на 4 дБ, и не требует наличия БИНС на борту снаряда.

11. Синтезирован алгоритм комплексной вторичной обработки информации для *устройства определения угловой ориентации* объекта на базе 4-х приемников СРНС и гироскопов БИНС, который обеспечивает высокую точность оценивания углов ориентации потребителя (ср. сф. ошибка 2 угл. мин) при высокой угловой динамике (макс. угловое ускорение до 14 рад/с², что на порядок лучше автономной угломерной НАП СРНС).

12. Создана универсальная компьютерная имитационная модель ИСНС, позволяющая определять характеристики точности и помехоустойчивости различных синтезированных в диссертации алгоритмов комплексной обработки информации в ИСНС.

13. Впервые в России создан макет ИСНС на базе программного приемника. Проведено экспериментальное исследование синтезированных в работе комплексных алгоритмов, в результате которого подтверждено повышение характеристик точности и улучшения способности сохранять слежение за сигналами СРНС в условиях высокой динамики по сравнению с алгоритмами НАП СРНС без комплексирования.

В приложениях приведены подробные математические результаты по синтезу рассмотренных в диссертации алгоритмов, дополнительные результаты исследования характеристик данных алгоритмов, разработанное программное обеспечение.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Перов А.И., Шатилов А.Ю. Сравнительный анализ характеристик двух алгоритмов комплексной вторичной обработки информации в инерциально-спутниковых навигационных системах. // Радиотехника. Радиосистемы. – 2003. – №7. С.88–98.

2. Перов А.И., Шатилов А.Ю. Синтез и анализ приемника сигналов спутниковых навигационных систем с оценкой амплитуды сигнала.// Радиотехника. – 2004. – №7. С.90–96.

3. Перов А.И., Шатилов А.Ю. Синтез комбинированного алгоритма комплексирования на первичном и вторичном уровнях в инерциально-спутниковой системе навигации. // Радиотехника. Радиосистемы. – 2005. – №7. С.4–14.

4. Шатилов А.Ю. Оптимизация систем слежения за несущей частотой сигнала СРНС на вращающемся снаряде с использованием гироскопа. // Радиотехнические тетради. – 2005. – №32. С.55–63.

5. Перов А.И., Шатилов А.Ю. Синтез и анализ одноэтапного алгоритма обработки сигналов в когерентном приемнике СРНС. // Радиотехника. Радиосистемы. – 2006. – №7. С.75–79.

6. Перов А.И., Шатилов А.Ю. Синтез и анализ комплексных СРНС/ИНС

алгоритмов обработки информации на вторичном уровне.// Научно-техническая конференция ФГУП «РНИИ космического приборостроения»: Докл. – М.,РНИИКП, 2003. – С.39.

7. Перов А.И., Шатилов А.Ю. Полный синтез канала первичной обработки приемника СРНС с возможностью поддержки от ИНС// Современные проблемы радиоэлектроники: Докл. всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов – Красноярск, КГТУ, 2004. – С.57–59.

8. Перов А.И., Шатилов А.Ю. Комплексный подход к первичной обработке информации в приемнике СРНС с использованием поддержки от ИНС. // Аэрокосмические приборные технологии: Докл. междунар. симпозиума 2-4 июня 2004 г. – СПб, ГУАП, 2004. – С.63–66.

9. Перов А.И., Шатилов А.Ю. Критичность инерциально-спутниковой навигационной системы с некогерентным СРНС приемником к точности определения углов ориентации. // Современные проблемы радиоэлектроники: Докл. всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов – Красноярск, КГТУ, 2005. – С. 61-63.

10. Перов А.И., Шатилов А.Ю. Эффект неустойчивости в инерциально-спутниковой навигационной системе с двухуровневым комплексированием и некогерентным приемником СРНС // Радиолокация, радионавигация, связь: Докл. междунар. научно-технической конференции. – Т.3. – Воронеж, НПФ «Саквояж», 2005. – С.1376-1384.

11. Шатилов А.Ю., Болденков Е.Н., Перов А.А. Программный приемник сигналов GPS. // Инновации в радиотехнических информационно-телекоммуникационных технологиях: Докл. юбилейной научно-технической конференции, октябрь 2006 г. – М.,МАИ,2006. – С.220–229.

12. Перов А.И., Шатилов А.Ю. Синтез и анализ вторичных алгоритмов обработки информации в комплексных ГЛОНАСС/ИНС системах.// Радиотехника, электроника и энергетика: Тез. докл. 8 междунар. конференции студентов и аспирантов. – Т.1. – М.,МЭИ,2002 – С.114.

13. Перов А.И., Шатилов А.Ю. Синтез и анализ алгоритмов интеграции инерциальных и спутниковых систем навигации по выходам псевдодальностей и псевдоскоростей приемника СРНС // Радиотехника, электроника и энергетика: Тез. докл. 9 междунар. конференции студентов и аспирантов – Т.1. – М.,МЭИ,2003. – С.114–115.

14. Перов А.И., Шатилов А.Ю. Комплексирование приемника СРНС и ИНС на уровне первичной обработки // Радиотехника, электроника и энергетика: Тез. докл. 10 междунар. конференции студентов и аспирантов. – Т.1. – М., МЭИ, 2004. – С.118–119.

15. Перов А.И., Шатилов А.Ю. Одноэтапный некогерентный приемник СРНС, комплексированный с БИНС. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. 11 международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Т.1. – М.,МЭИ,2005. – С.126–127.

16. Перов А.И., Шатилов А.Ю. Оптимизация работы системы ФАП на вращающихся объектах. // Радиооптические технологии в приборостроении: Тез. докл. 3 научно-технической конференции, сентябрь 2005 г. – М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – С.358.

17. Перов А.И., Шатилов А.Ю. Предложения по универсальному протоколу обмена данными СРНС-ИНС. // Радиооптические технологии в приборостроении: Тез. докл. 3 научно-технической конференции, сентябрь 2005 г. – М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – С.380.

18. Перов А.И., Шатилов А.Ю. Комплексная обработка сигналов от угломерной аппаратуры СРНС и инерциальных датчиков угловой скорости. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. 12 международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Т.1. – М., МЭИ, 2006. – С.153.

19. Шатилов А.Ю., Болденков Е.Н., Перов А.А., Перов А.И. Программный приемник сигналов GPS. // Радиооптические технологии в приборостроении: Тез. докл. 4 научно-технической конференции, сентябрь 2006 г. – М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – С.258.