

УДК 629.783

На правах рукописи

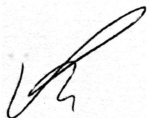
Пельтин Антон Владимирович

**СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ,
ИСПОЛЬЗУЮЩИХ РЕТРАНСЛИРОВАННЫЕ СИГНАЛЫ
РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



Москва – 2012

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Власов Игорь Борисович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, зав.
кафедрой «Радиотехнические системы»
Национального исследовательского
университета МЭИ
Перов Александр Иванович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
ФГКУ «3 ЦНИИ Минобороны России»
Слюсарев Вадим Валентинович

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

Защита состоится 20 декабря 2012 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.141.11 в Московском государственном
техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва,
2-ая Бауманская ул., д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенные печатью
учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская
ул., д.5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного
совета Д 212.141.11

Автореферат разослан « 14 » 11 20

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2011384

Пельтин А.В. Синтез алгорит

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.11
доктор технических наук, профессор

И.Б. Власов

- 385

2654

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время спутниковая радионавигация рассматривается как одна из важнейших высоких технологий, обеспечивающих информационную независимость и безопасность государства. Федеральная целевая программа «ГЛОНАСС» предусматривает широкое внедрение современных достижений технологии глобальной спутниковой навигации в системы специального, двойного и гражданского назначения.

Дальнейший прогресс в области повышения качества навигационно-временных определений (НВО) – точности, доступности, достоверности т.п., требует как развития структуры глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), так и разработки более совершенных методов и алгоритмов НВО для аппаратуры потребителей (АП).

Развитие структуры ГНСС в настоящее время идет по пути разработки новых, более совершенных навигационных космических аппаратов (НКА), применения новых типов навигационных сигналов, модернизации и развития наземного комплекса управления, а также создания так называемых средств функциональных дополнений (СФД), позволяющих потребителю получить дополнительную информацию и использовать ее для повышения качества НВО.

Наиболее известным и распространенным видом СФД являются так называемые дифференциальные подсистемы (ДПС). В состав ДПС могут входить как средства космического базирования (геостационарные и среднербитальные спутники действующих и развертываемых систем WAAS, EGNOS, MSAS, IRNSS, СДКМ), так и наземные контрольно-корректирующие станции (ККС). Использование в АП информации, получаемой от ДПС, позволяет потребителю уменьшить (в идеальном случае – полностью устранить) коррелированную составляющую погрешности измерения радионавигационных параметров (РНП), и, соответственно, повысить точность НВО.

Еще одним видом СФД является ретранслятор (Р) сигналов ГНСС. В настоящее время Р подразделяют, как правило, на аналоговые и цифровые, а также узкополосные и широкополосные. Для ряда практических задач широкополосный аналоговый Р, осуществляющий усиление, перенос спектра принимаемых сигналов НКА по частоте и излучение последних, обладает определенными преимуществами по сравнению с другими вариантами Р. На практике обычно рассматривают два направления использования такого Р:

- в качестве неподвижной опорной радионавигационной точки для повышения доступности ГНСС, т.е. в качестве альтернативы псевдоспутникам (pseudolite);
- в качестве источника информации при решении задач определения параметров траектории подвижных объектов.

В настоящей работе основное внимание уделяется второму направлению использования широкополосных аналоговых Р, а именно, системам измерения

параметров траектории высокодинамичных объектов, т.е. систем внешнетраекторных измерений (ВТИ). Наряду с основной функцией – прием, перенос спектра по частоте, усиление и излучение сигналов НКА – такой Р может формировать и излучать специальный пилот-сигнал (ПС). В диссертации рассматривается как известный вариант Р с аддитивным ПС (АПС), так и вариант Р с мультипликативным ПС (МПС).

Совершенствование методов и алгоритмов НВО охватывает все виды обработки сигналов в АП ГНСС, включая:

- дифференциальные (относительные) измерения, основанные на совместной обработке информации, извлекаемой из сигналов НКА и СФД;
- оптимальную (согласованную) фильтрацию, поиск и обнаружение сигнала;
- оценку радионавигационных параметров (РНП), навигационных параметров (НП) или (и) параметров вектора состояния (ВС) потребителя (координат, вектора скорости и ускорения) в следящих измерителях.

В данной диссертации основное внимание уделяется методам и алгоритмам фильтрации НП или ВС при обработке (в том числе – совместной) прямых и ретранслированных сигналов НКА. При этом, с учетом современных тенденций, рассматриваются алгоритмы комплексной (совместной) фильтрации РНП: задержки, фазы несущей и доплеровского сдвига частоты, имеющие ряд преимуществ по сравнению с алгоритмами независимой фильтрации указанных параметров.

Рассматривается два типа алгоритмов НВО:

- двухэтапные, предполагающие разделение процесса оценки составляющих ВС потребителя на первичную (выделение и фильтрацию РНП по сигналам каждого НКА) и вторичную (фильтрацию НП и компонент ВС) обработку;
- одноэтапные, основанные на совместной фильтрации компонент ВС с использованием совокупности измерений РНП по всем доступным сигналам НКА.

Двухэтапные алгоритмы хорошо изучены и находят широкое применение в современной АП; одноэтапные алгоритмы, потенциально обеспечивающие более высокую точность НВО, представляют собой реальную перспективу развития АП.

С учетом изложенного, в данной диссертации в качестве основных избраны следующие направления исследований.

1. На системно-структурном уровне – особенности построения и использования радиосистем с ретрансляторами сигналов НКА в системах ВТИ для определения параметров траектории (пространственных координат, компонент вектора скорости) объекта, на борту которого установлен Р, путем приема и обработки ретранслированных сигналов в наземном измерительном пункте.

2. На программно-алгоритмическом уровне – анализ методов НВО с использованием ретранслированных и прямых сигналов НКА, а также синтез оптимальных алгоритмов обработки этих сигналов.

Единую методическую основу для решения в данной работе задачи разработки алгоритмов, учитывающих особенности НВО с использованием ретранслированных сигналов дает теория оптимальной нелинейной фильтрации. Общая теория статистического синтеза алгоритмов фильтрации марковских процессов развита в работах А.Н. Колмогорова, Н. Винера, Р.Е. Калмана, Р.Л. Стратоновича. Значительный вклад в применение этой теории в радиотехнических системах внесли работы В.И. Тихонова, В.Н. Харисова, С.М. Ярлыкова, А.И. Перова.

Однако работ, посвященных задачам синтеза алгоритмов оптимальной совместной обработки прямых и ретранслированных сигналов НКА и Р в приложениях, связанных с оценкой параметров движения динамических объектов, в том числе, с использованием дифференциальных методов и методов относительных измерений, крайне мало.

Таким образом, **актуальность** данной работы определяется необходимостью проработки комплекса не исследованных до сих пор теоретических вопросов, связанных с синтезом и анализом оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов обработки сигналов Р, а также алгоритмов обработки этих сигналов совместно с прямыми сигналами НКА.

Целью работы является развитие методов обработки радионавигационных сигналов, обеспечивающих повышение точности, непрерывности и доступности НВО в системах, использующих ретранслированные сигналы ГНСС для определения параметров траектории динамических объектов.

В диссертации **решены следующие задачи:**

1. Проведены обзор и анализ методов определения траектории динамических объектов в системах, использующих сигналы ГНСС.

2. Предложены модели сигналов и их РНП для Р с аддитивным ПС и мультипликативным ПС.

3. Синтезированы одноэтапные алгоритмы комплексной обработки прямых и ретранслированных сигналов ГНСС и ПС для системы определения траекторий динамических объектов, использующей Р с аддитивным и мультипликативным ПС.

4. Синтезированы алгоритмы первичной и вторичной обработки сигналов для аппаратуры приема и обработки ретранслированных сигналов (АПРС), реализующей двухэтапный принцип обработки в системе определения траекторий динамических объектов, использующей Р с аддитивным ПС.

5. Синтезирован адаптивный алгоритм интерполяции на фиксированном интервале при постобработке данных цифрового регистратора системы определения траекторий динамических (маневрирующих) объектов. Проведен

сравнительный анализ характеристик предложенного алгоритма с рядом известных.

6. Разработаны программно-математические средства имитационного моделирования для исследования характеристик синтезированных алгоритмов и с их помощью проведены анализ и исследование характеристик одноэтапных и двухэтапных алгоритмов обработки сигналов.

7. Создан опытный образец аппаратно-программного комплекса траекторных измерений с широкополосным аналоговым Р, реализующий предложенные методы и алгоритмы обработки сигналов, и проведены его экспериментальные исследования.

Методы исследований. При решении указанных выше задач в теоретических и экспериментальных исследованиях были использованы методы теории вероятности и случайных процессов, статистического анализа и синтеза, методы оптимальной линейной и нелинейной фильтрации, а также методы имитационного моделирования, полунатурных и натурных испытаний.

На защиту выносятся:

- результаты синтеза одноэтапных алгоритмов комплексной обработки прямых и ретранслированных сигналов ГНСС для системы определения траектории динамичного объекта, использующей Р с аддитивным и мультипликативным ПС;
- результаты синтеза двухэтапных алгоритмов комплексной обработки прямых и ретранслированных сигналов ГНСС и для системы определения траектории динамичного объекта, использующей Р с аддитивным ПС;
- программно-математические модели в среде MATLAB для исследования характеристик предложенных алгоритмов;
- результаты исследований характеристик одноэтапных и двухэтапных алгоритмов АПРС для системы определения траекторий динамичных объектов;
- результаты синтеза адаптивных алгоритмов интерполяции (сглаживания) при постобработке данных цифрового регистратора АПРС и результаты экспериментальных испытаний таких алгоритмов;
- пакет программ для постобработки записи массива дискретных выборок сигналов НКА и ретранслятора, фиксируемых цифровым регистратором АПРС;
- результаты экспериментальных исследований опытного образца АПРС в режиме постобработки записи массива дискретных выборок прямых и ретранслированных сигналов НКА и ПС.

Научная новизна результатов, полученных в диссертации.

1. С использованием предложенных моделей ретранслированных сигналов и моделей их РНП решена задача синтеза одноэтапных алгоритмов комплексной обработки прямых и ретранслированных сигналов ГНСС для системы определения параметров траекторий динамичных объектов, использующей Р с АПРС.

2. С использованием вышеуказанных моделей решена задача синтеза одноэтапных алгоритмов комплексной обработки прямых и ретранслированных сигналов ГНСС для системы определения параметров траекторий динамичных объектов, использующей Р с МПС.

3. Применительно к широко используемой на практике схеме двухэтапной обработки синтезированы алгоритмы комплексной обработки прямых и ретранслированных сигналов ГНСС для системы определения параметров траекторий динамичных объектов, использующей Р с АПС.

4. В режиме постобработки сигналов НКА и Р с АПС реализованы одноэтапный и двухэтапный алгоритмы комплексной обработки прямых и ретранслированных сигналов ГНСС.

5. Для системы определения траекторий динамичных (маневрирующих) объектов, работающей в режиме постобработки данных цифрового регистратора, предложен и синтезирован адаптивный алгоритм интерполяции на фиксированном интервале.

Практическая значимость работы.

1. Разработаны алгоритмы комплексной обработки прямых и ретранслированных сигналов ГНСС для системы траекторных измерений с Р, позволяющие повысить точность, непрерывность и доступность измерения траекторий динамичных объектов.

2. Разработан адаптивный алгоритм интерполяции (сглаживания) для задачи постобработки данных цифрового регистратора АПС, позволяющий повысить точность определения параметров траектории динамичных объектов.

3. Разработаны программно-математические средства моделирования, позволяющие проводить исследование характеристик систем траекторных измерений с ретранслятором.

4. Разработан аппаратно-программный комплекс постобработки записи массива дискретных выборок прямых и ретранслированных сигналов ГНСС, позволяющий также осуществлять исследование и отладку перспективных алгоритмов обработки сигналов ГНСС.

5. Рассмотрен круг вопросов, связанных с практической реализацией систем для измерения траекторий динамичных объектов с использованием широкополосных аналоговых ретрансляторов.

Реализация и внедрение результатов исследования.

Результаты диссертации использованы при проведении ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ выполненных в период 2007 – 2012 гг. на кафедре РЛ-1 и в НИИ РЭТ МГТУ им. Баумана при непосредственном участии автора: НИР «Авальман-МГТУ», «Штифт» «Траектория-МГТУ», ОКР «Преломление», что подтверждено соответствующими актами о внедрении.

Апробация результатов. По материалам диссертации сделано 8 докладов на научно-технических семинарах и конференциях, в том числе:

- на международных научно-технических конференциях «Радиолокация, радионавигация, связь», Воронеж, Воронежский государственный университет, 2008, 2010, 2011 г.г.

- на научно-технических конференциях «Радиооптические технологии в приборостроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 2008, 2010 – 2012 г.г.

Публикации. Результаты диссертационной работы изложены в 6 публикациях, в том числе, 4 – в изданиях, входящих в Перечень ВАК. По теме диссертации получен патент РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Основная часть работы изложена на 199 страницах, содержит 18 таблиц, 77 рисунков и список литературы из 109 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит общую характеристику проблемы и актуальности выбранной темы. Сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, практическая ценность и положения, представляемые к защите.

В первой главе проведен обзор и анализ существующих методов траекторных измерений подвижных объектов с использованием сигналов ГНСС, осуществляется выбор и обоснование структуры системы траекторных измерений динамичных объектов с Р. Описаны модели сигналов ретранслятора с аддитивным ПС, обобщены выражения для навигационных и радионавигационных параметров сигналов в АПРС. Рассмотрены особенности систем определения траектории подвижных объектов при использовании Р с мультипликативным ПС и предложены соответствующие модели для сигналов ретранслятора.

Во второй главе проведен синтез одноэтапных алгоритмов комплексной обработки прямых и ретранслированных сигналов ГНСС с оценкой коррелированных составляющих ошибок измерений РНП сигналов НКА для системы определения параметров траектории подвижных объектов на базе широкополосного аналогового Р с аддитивным и мультипликативным ПС.

Для прямых и переизлученных сигналов НКА, наблюдаемых в АПРС можно выделить ряд коррелированных составляющих погрешностей измерения РНП сигналов ГНСС: погрешности эфемеридно-временного обеспечения; погрешность, обусловленная задержкой сигналов в ионосфере и тропосфере. При совместной обработке в АПРС прямых сигналов НКА и сигналов Р существует принципиальная возможность снизить влияния указанных составляющих погрешностей измерения РНП на итоговую погрешность определения пространственных координат и компонент вектора скорости Р.

В диссертации рассматриваются два варианта алгоритма: алгоритм оценки абсолютных координат и вектора скорости Р для неподвижного АПРС с известными координатами и алгоритм оценки относительных координат и вектора скорости Р в системе координат, связанной с подвижным АПРС.

При синтезе одноэтапного алгоритма для неподвижной АПРС с известными координатами использовано представление вектора ВС в виде:

$$\mathbf{x} = [\mathbf{X}_p^T \quad \dot{\mathbf{X}}_p^T \quad \ddot{\mathbf{X}}_p^T \quad V'_A \quad V'_p \quad \Delta_{p,tr} \quad \dot{\Delta}_{p,tr} \quad \ddot{\Delta}_{p,tr} \quad \ddot{R}_p \quad \ddot{R}_{dp} \quad \ddot{R}_d^T \quad \ddot{R}_{d\Sigma}^T \quad \Delta^T \quad \dot{\Delta}_c^T]^T, \quad (1)$$

где $\mathbf{X}_p$ – координаты Р в ГЦСК; $\dot{\mathbf{X}}_p$ – компоненты вектора скорости Р в ГЦСК; $\ddot{\mathbf{X}}_p$ – компоненты вектора ускорения Р в ГЦСК; V'_A – смещение частоты ОГ АПРС, приведенное к единицам скорости; V'_p – смещение частоты ОГ Р, приведенное к единицам скорости; $\ddot{R}_p$ – псевдодальность по ПС; $\ddot{R}_{dp}$ – переменная, связанная с фазой ПС $\ddot{R}_{dp} = \frac{\lambda_p}{2 \cdot \pi} \ddot{\varphi}_p$; $\ddot{R}_d, \ddot{R}_{d\Sigma}$ – переменные, связанные с фазами прямых и ретранслированных сигналов соответственно; $\ddot{R}_{d\Sigma,k} = [\ddot{R}_{d\Sigma 1,k} \quad \dots \quad \ddot{R}_{d\Sigma N,k}]^T$, $\ddot{R}_{d,k} = [\ddot{R}_{d1,k} \quad \dots \quad \ddot{R}_{dN,k}]^T$, $\ddot{R}_{dp,k}$ – дополнительные компоненты, связанные соответственно с фазами ретранслированных, прямых сигналов НКА и ПС;

Компоненты $\Delta_{p,tr}, \dot{\Delta}_{p,tr}$ и вектора $\Delta, \dot{\Delta}_c$ в составе ВС (1) содержат коррелированные составляющие погрешностей измерения РНП прямых сигналов НКА и сигналов Р, обусловленных задержкой в тропосфере для ретранслированных сигналов НКА на участке Р-АПРС, задержкой в ионосфере и отклонением бортовой шкалы времени НКА соответственно, а также их производные.

Полученная в результате синтеза структура одноэтапного алгоритма обработки сигналов Р с АПС показана на рисунке 1.

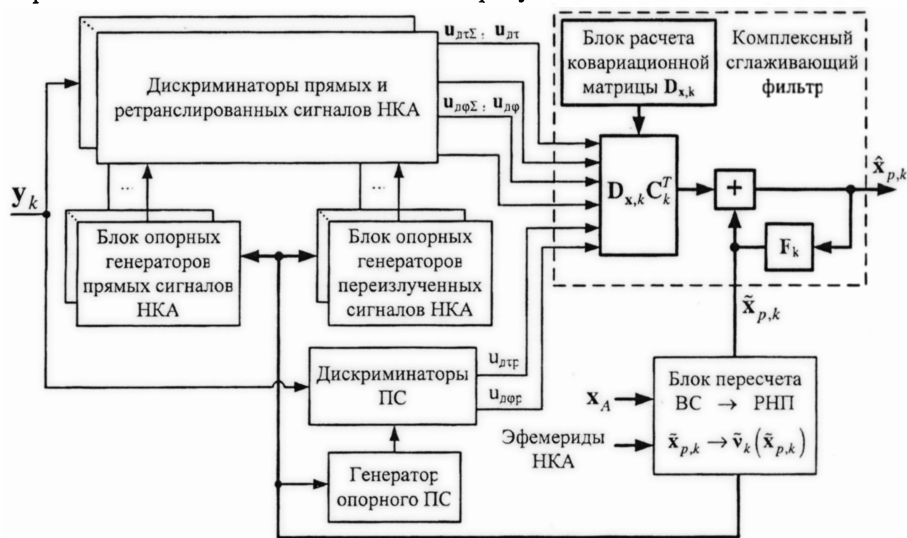


Рисунок 1

Также синтезирован одноэтапный алгоритм оценки относительных координат и вектора скорости P в системе координат, связанной с подвижным АПРС. Такой алгоритм позволяет оценивать относительную траекторию P при неточно известных координатах и векторе скорости АПРС. Основное отличие этого алгоритма от алгоритма оценки абсолютных координат и скорости P состоит в модификации уравнений априорной динамики дополнительных переменных $\tilde{R}_d$ и $\tilde{R}_{d\Sigma}$, связанных с фазами прямых и ретранслированных сигналов НКА ГНСС соответственно.

Для анализа точностных и статистических характеристик разработанного алгоритма в различных условиях наблюдения НКА была разработана программно-математическая модель (ПММ) в среде MATLAB. Структура ПММ показана на рисунке 2.



Рисунок 2.

На рисунках 3 и 4 показаны соответственно результаты расчета ошибок определения координат и вектора скорости объекта, ионосферных и тропосферной составляющих эквивалентной погрешности дальности (ЭПД) в АПРС, работающей по сигналам P с АПС. Результаты получены при использовании траектории, характерной для реактивного снаряда, для семи НКА, видимых с борта объекта и $\Gamma\Phi \approx 3,8$.

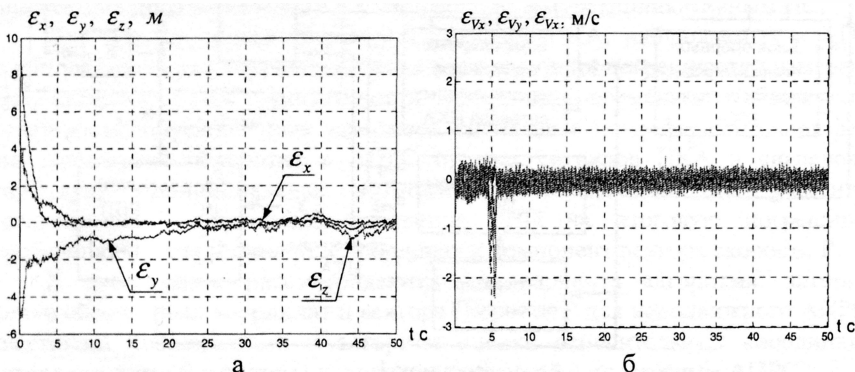


Рисунок 3. Ошибки оценки координат (а) и компонент вектора скорости (б).

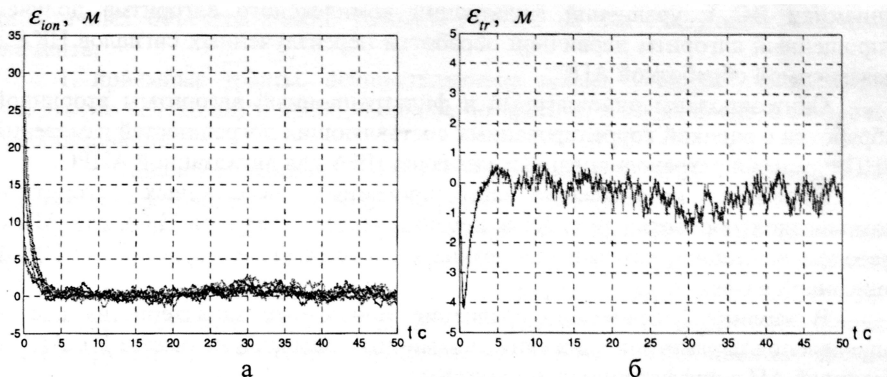


Рисунок 4. Ошибки оценки ионосферных (а) и тропосферной (б) составляющих ЭПД

Для сравнения точностных характеристик АПРС, использующего алгоритм комплексной обработки прямых и ретранслированных сигналов ГНСС (как при использовании Р с АПС, так и Р с МПС), и бортовой АП, работающей в дифференциальном режиме, с использованием одной и той же траектории объекта был проведен расчет погрешностей оценки координат, результаты которого приведены в таблице 1. Предполагалось, что коррекция измерений псевдодальностей в бортовой АП осуществляется на основании данных, полученных по каналу корректирующей информации. Как следует из таблицы, разработанные алгоритмы обеспечивают более высокую точность траекторных измерений, по сравнению с использованием бортовой АП.

Таблица 1

ГФ	Р с АПС	Р с МПС	Бортовая АП
	$\sigma_{xyz}, \text{ м}$	$\sigma_{xyz}, \text{ м}$	$\sigma_{xyz}, \text{ м}$
3,8	0,55	0,57	1,0
4,2	0,65	0,88	1,2
6	0,55	0,83	1,6
9,3	0,61	0,80	2,4
11	1,0	1,1	3,1

Третья глава посвящена синтезу алгоритмов первичной и вторичной обработки прямых сигналов НКА и сигналов Р с аддитивным ПС для АПРС, построенной по традиционной схеме с двухэтапной обработкой. Алгоритмы вторичной обработки подразумевают совместную обработку прямых и ретранслированных сигналов ГНСС с оценкой коррелированных составляющих ошибок измерений РНП сигналов НКА.

Осуществлен синтез комплексного алгоритма первичной обработки ретранслированных сигналов НКА и АПС. Путем модификации модели

динамики ВС и уравнений фильтрации комплексного алгоритма получен упрощенный алгоритм первичной обработки переизлученных сигналов НКА с независимой обработкой АПС.

Синтезированы одношаговый и фильтрационный алгоритмы вторичной обработки с оценкой коррелированных составляющих погрешностей измерений РНП прямых и ретранслированных сигналов НКА для двухэтапной АПРС.

Проведено исследование синтезированных двухэтапных алгоритмов комплексной обработки прямых и переизлученных сигналов НКА для АПРС методом имитационного моделирования в среде MATLAB с помощью ПММ, описанной в главе 2.

В таблице 2 приведено сравнение точностных характеристик систем определения параметров движения динамичных объектов на основе Р с АПС и бортовой АП в дифференциальном режиме.

Таблица 2

ГФ	$\sigma_{\text{дл}}, \text{ м}$		$\sigma_v, \text{ м/с}$	
	Р с АПС	Бортовая АП	Р с АПС	Бортовая АП
3,8	0,58	1,0	0,21	0,22
4,2	0,76	1,2	0,27	0,26
6	0,84	1,6	0,32	0,33
9,3	0,95	2,4	0,50	0,51
11	1,1	3,1	0,61	0,63

Как следует из таблицы 2, разработанные алгоритмы обеспечивают уменьшение СКО оценок координат примерно в 1,5..2 раза, по сравнению с бортовой АП, работающей в дифференциальном режиме.

В четвертой главе рассмотрен адаптивный алгоритм интерполяции (сглаживания) траектории Р на фиксированном интервале в задаче обработки данных цифрового регистратора АПРС системы траекторных измерений динамичных объектов, позволяющий повысить точность определения параметров движения динамичных (маневрирующих) объектов в режиме постобработки.

В ряде практических случаев для решения задачи определения параметров траектории динамичного объекта условие получения оценок координат и скорости в режиме реального времени не является обязательным. При этом можно отказаться от традиционного подхода к проектированию комплексов и полностью перейти к аппаратуре, работающей в режиме постобработки массива записи дискретных выборок аналого-цифровых преобразователей (АЦП) приемных трактов АПРС. При таком принципе построения аппаратуру комплекса для измерения параметров траектории

динамических объектов можно условно разбить на два следующих основных элемента:

1. приемные тракты, осуществляющие прием, усиление, фильтрацию (частотную селекцию) и преобразование по частоте, а также аналого-цифровое преобразование;

2. специализированной ЭВМ, осуществляющей запись и обработку массива дискретных выборок АЦП (цифровой регистратор).

Задачу постобработки массива дискретных выборок АЦП цифрового регистратора АПРС можно рассматривать как задачу интерполяции (сглаживания) случайных процессов на фиксированном интервале. Для повышения точности оценки параметров движения именно динамических (маневрирующих) объектов предлагается также использовать методы адаптивной фильтрации, позволяющие учитывать неопределенность параметров априорной модели динамики вектора состояния λ_k .

Выражение для апостериорной плотности вероятности (ПВ) $p(\lambda_k | Y_0^N)$ может быть получено как:

$$p(\lambda_k | Y_0^N) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(\lambda_k, \alpha_k | Y_0^N) d\alpha = \int_{-\infty}^{+\infty} p(\lambda_k | Y_0^N, \alpha) p(\alpha_k | Y_0^N) d\alpha, \quad (2)$$

где вектор α_k характеризует неопределенные параметры априорной модели динамики ВС λ_k .

Адаптивный алгоритм интерполяции (сглаживания) на фиксированном интервале можно условно разделить на четыре этапа:

1. фильтрация в прямом времени – получение ПВ $p(\lambda_k | Y_0^k, \alpha_k)$ и $p(\alpha_k | Y_0^k)$;
2. фильтрация в обратном времени – получение ПВ $p(Y_{k+1}^N | \lambda_k, \alpha_k)$ и $p(Y_{k+1}^N | \alpha_k)$;
3. многоканальная интерполяция – получение ПВ $p(\lambda_k | Y_0^N, \alpha_k)$ и $p(\alpha_k | Y_0^N)$;
4. итоговая оценка – получение ПВ $p(\lambda_k | Y_0^N)$.

В работе проведены моделирование и сравнительный анализ предложенного алгоритма интерполяции с рядом других известных алгоритмов (в частности, с адаптивным алгоритмом текущей фильтрации и алгоритмом интерполяции без адаптации).

В таблице 3 приведены погрешности (СКО) оценки скорости объекта для трех различных алгоритмов по результатам имитационного моделирования при

использовании траектории, характерной для реактивного снаряда, подтверждающие преимущества разработанного алгоритма.

Таблица 3

	Алгоритм адаптивной текущей фильтрации	Алгоритм интерполяции без адаптации	Адаптивный алгоритм интерполяции
σ_{V_x} , м/с	0,030	0,018	0,0055
σ_{V_y} , м/с	0,025	0,014	0,0060
σ_{V_z} , м/с	0,086	0,023	0,0140
σ_V , м/с	0,094	0,032	0,016

В пятой главе представлено описание опытного образца комплекса аппаратуры траекторных измерений динамических объектов на основе принципа ретрансляции сигналов ГНСС, разработанного в рамках ОКР «Преломление». Аппаратура создана в МГТУ им. Р.Э. Баумана при непосредственном участии автора в период 2007-2011 г.г. В опытном образце был использован широкополосный аналоговый Р с аддитивным ПС в виде синусоидального сигнала, модулированного по фазе несущей псевдослучайной последовательностью. Аппаратура приема и обработки ретранслированных сигналов была создана на базе АП типа МРК-101 производства ФГУП «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск). Отличительной особенностью опытного образца является наличие в АПРС канала цифрового регистратора (ЦР), позволяющего фиксировать на внешнем носителе массив дискретных выборок АЦП трактов приема прямых сигналов НКА и сигналов Р для последующей постобработки. В программном обеспечении (программа постобработки данных ЦР) опытного образца комплекса аппаратуры траекторных измерений были использованы двухэтапный и одноэтапный алгоритмы комплексной обработки прямых и ретранслированных сигналов ГНСС (главы 2 и 3). Разработанный опытный образец прошел государственные испытания с присвоением литеры «О1», что подтверждено соответствующими протоколами.

В рамках испытаний макета проведены две группы экспериментов: натурные испытания и испытания с применением имитатора сигналов ГНСС. Натурные испытания макета канала ретрансляции состояли из двух серий экспериментов на различных подвижных объектах: легковой автомобиль и беспилотный летательный аппарат.

Натурные испытания опытного образца подтвердили возможность компенсации погрешностей, обусловленных задержкой сигналов НКА в ионосфере и тропосфере, ошибками эфемеридно-временного обеспечения при использовании алгоритмов комплексной обработки прямых и ретранслированных сигналов ГНСС. Для легкового автомобиля максимальные ошибки определения по каждой из координат не превысили 4 м при

использовании одноэтапного алгоритма и 4,5 м при использовании двухэтапного алгоритма в режиме постобработки данных ЦР относительно эталонной траектории, полученной по измерениям контрольных навигационных приемников.

В режиме постобработки данных ЦР реализован также рассмотренный в главе 4 адаптивный алгоритм интерполяции (сглаживания) на фиксированном интервале. Проведенные испытания АПРС в режиме постобработки данных ЦР с применением имитатора сигналов ГНСС при использовании траектории, характерной для реактивного снаряда показали, что характеристики адаптивного алгоритма интерполяции (сглаживания) хорошо согласуются с характеристиками, полученными в результате имитационного моделирования в главе 4.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы, приведенные ниже.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе анализа методов траекторных измерений с использованием сигналов ГНСС установлено, что в ряде приложений для повышения точности и непрерывности определения параметров траектории динамичных объектов наиболее целесообразным и эффективным является построение систем на базе широкополосного аналогового Р в сочетании с переходом в режим постобработки массива дискретных выборок АЦП приемных трактов. Режим реального времени при этом используется как не основной (вспомогательный).

2. Подробно рассмотрены особенности преобразования сигналов НКА в широкополосном аналоговом ретрансляторе и получены выражения для моделей РНП переизлученных сигналов НКА и ПС, справедливые при высокой динамике изменения параметров, вызванной движением Р и нестабильностью частоты ОГ Р. На основе анализа характеристик сигналов Р с мультипликативным ПС показано, что такой Р имеет определенные преимущества и может быть успешно использован в различных приложениях там, где традиционной схеме Р с аддитивным ПС присущи некоторые ограничения (например, в условиях ограниченного частотного ресурса и при необходимости одновременного приема сигналов нескольких Р).

3. На основе теории оптимальной нелинейной фильтрации для АПРС, работающей по сигналам Р синтезированы:

- одноэтапные алгоритмы комплексной обработки прямых и ретранслированных сигналов ГНСС для системы определения траекторий динамичных объектов, использующей Р с аддитивным ПС или мультипликативным ПС;

- алгоритмы первичной и вторичной обработки для двухэтапной АПРС с комплексной обработкой прямых и ретранслированных сигналов ГНСС для системы определения траекторий подвижных объектов на базе Р с АПС.

4. Разработаны имитационные модели, позволяющие проводить исследование характеристик синтезированных одноэтапных и двухэтапных алгоритмов для АПРС.

5. Методом имитационного моделирования показано, что:

- использование как одноэтапных, так и двухэтапных алгоритмов комплексной обработки прямых и ретранслированных сигналов ГНСС в системах определения траекторий динамичных объектов, использующих Р, позволяет компенсировать погрешности, обусловленные задержками сигналов НКА в ионосфере и тропосфере, ошибками эфемеридно-временного обеспечения, и повысить точность определения координат объекта по сравнению с бортовой АП, работающей в дифференциальном режиме, в 1,5...2 раза при $\Gamma\Phi < 4$ и в 2...3 раза при $\Gamma\Phi > 5$;

- характеристики АПРС при работе по сигналам Р с мультипликативным ПС и применении одноэтапной обработки лишь немного уступают характеристикам аппаратуры, работающей по сигналам Р с аддитивным ПС: погрешности оценки координат больше на 15...20%, погрешности оценки компонент вектора скорости больше 25...30%;

- для уменьшения влияния нестабильности частоты ОГ Р и достижения наилучших характеристик одноэтапной АПРС, работающей по сигналам Р с МПС, а также двухэтапной АПРС, работающей по сигналам Р с АПС, рекомендуется выбирать схему построения тракта Р, при которой частота гетеродина ниже частоты сигналов НКА, принимаемых Р;

6. Предложен и синтезирован адаптивный алгоритм интерполяции (сглаживания) на фиксированном интервале, позволяющий в режиме постобработки повысить в 1,5...2,5 раза точность оценивания параметров движения динамичных (маневрирующих) объектов в системах траекторных измерений на базе метода широкополосной аналоговой ретрансляции.

7. Разработан и испытан аппаратно-программный комплекс постобработки АПРС, состоящий из канала цифрового регистратора и программы обработки, реализующей синтезированные в работе одноэтапные и двухэтапные алгоритмы комплексной обработки прямых и ретранслированных сигналов ГНСС и ПС, а также адаптивный алгоритм интерполяции на фиксированном интервале в режиме постобработки.

В приложении приведен подробный вид матриц, относящихся к синтезу рассмотренных в диссертации алгоритмов.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Пудловский В.Б., Пельтин А.В. Дифференциальная коррекция координат на основе одноэтапного алгоритма совместной обработки прямых и ретранслированных сигналов СРНС // Радиолокация, навигация и связь: Сб. трудов междунар. конф. Воронеж, 2008. С. 2053 – 2060.

2. Пудловский В.Б., Пельтин А.В. Одноэтапный алгоритм фильтрации траектории ретранслятора сигналов СРНС // Радиотехника. 2007. №7. С. 91-101.
3. Результаты натурных испытаний канала ретрансляции системы внешнетраекторных измерений на подвижном объекте / И.Б. Власов [и др.] // Вестник МГТУ. Приборостроение.. 2009. Специальный выпуск. Радиолокация, спутниковая навигация и связь, радиоастрономия. С. 150-158.
4. Пельтин А.В. Ретранслятор спутниковых радионавигационных систем с мультипликативным пилот-сигналом // Вестник МГТУ. Приборостроение. 2012. №2. С. 101-108
5. Пудловский В.Б., Пельтин А.В. Исследование характеристик систем, использующих ретранслированные сигналы СРНС // Радиооптические технологии в приборостроении: Сб. материалов V-VI ВНТК. Туапсе, 2008. С. 119-121.
6. Пудловский В.Б., Пельтин А.В. Использование наземного ретранслятора сигналов СРНС для высокоточных навигационных измерений // Радиооптические технологии в приборостроении: Сб. материалов V-VI ВНТК. Туапсе, 2008. С. 115-118.
7. Пудловский В.Б., Пельтин А.В. Одноэтапный когерентный алгоритм фильтрации координат и скорости ретранслятора сигналов спутниковых радионавигационных систем // Вестник МГТУ. Приборостроение. 2009. Специальный выпуск. Радиолокация, спутниковая навигация и связь, радиоастрономия. С. 158-166.
8. Пельтин А.В. Одноэтапный алгоритм фильтрации координат и скорости ретранслятора сигналов ГНСС с дифференциальной коррекцией // Радионавигационные технологии в приборостроении: Сб. материалов ВНТК. Туапсе, 2010. С. 76-79.
9. Пельтин А.В., Кондратьев А.С., Гаврилов А.И. Цифровой регистратор аппаратуры приема и обработки ретранслированных сигналов ГНСС // Радиолокация, навигация и связь: Сб. трудов междунар. конф. Воронеж, 2011. – С. 1949-1954.
10. Устройство для определения координат и скорости движущегося объекта (Варианты): / И.Б. Власов [и др.] заявл. 24.12.2010; решение 11.03.2012.