

На правах рукописи



Михайлов Николай Викторович

**АВТОНОМНАЯ НАВИГАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ
СИСТЕМ**

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург - 2015

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

Официальные оппоненты: **Степанов Олег Андреевич**
доктор технических наук, профессор, начальник Научно-образовательного центра акционерного общества "Концерн "Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор"

Тисленко Владимир Ильич
доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехнические системы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Урличич Юрий Матэвич
доктор технических наук, профессор, заместитель руководителя Аналитического центра при Правительстве Российской Федерации

Ведущая организация: **Открытое акционерное общество "Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королёва"**

Защита состоится "16" февраля 2016 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 212.233.05 в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения" по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67, ауд. 53-01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения" и на сайте www.guap.ru

Автореферат разослан "16" ноября 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Овчинников Андрей Анатольевич
к.т.н., доцент

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Навигация искусственных спутников Земли (ИСЗ) традиционно осуществляется при помощи контрольных станций слежения (КСС). На Земле создается сеть территориально разнесенных КСС, которые проводят высокоточные измерения текущих параметров движения ИСЗ. Результаты измерений собираются в центре управления, где производится расчет параметров орбиты и осуществляется прогноз движения ИСЗ.

Существует большой положительный опыт обеспечения навигации ИСЗ сетью наземных станций траекторных измерений. Тем не менее, имеются сложности в применении этой сети. Сеть наземных станций России размещена на ограниченной территории и не может обеспечить проведение измерений в любой точке орбиты. Поддержание, развитие и эксплуатация наземного сегмента управления составляют значительную часть стоимости космических проектов. Навигационное планирование и контроль орбиты требуют значительных трудозатрат квалифицированного персонала. Если в зоне видимости одной КСС находится несколько спутников и для каждого из них нужно осуществлять планирование и контроль, задача становится не только сложной даже для опытных инженеров, но и возникает существенный риск ошибки, которая может привести к нежелательным отклонениям от орбиты и даже к потере спутников.

Таким образом, использование КСС имеет ряд существенных недостатков, к которым относят:

1. высокие затраты на создание и обслуживание КСС;
2. невозможность маневра спутника вне зоны видимости КСС;
3. значительное время на подготовку маневров ИСЗ и невозможность автоматизированных маневров.

Навигация ИСЗ, осуществляемая на борту спутника автономно, т. е. независимо от КСС, лишена вышеуказанных недостатков навигации с использованием наземных станций.

Принципиальное отличие автономной навигации от методов, использующих наземную инфраструктуру, в том, что по определению ИСЗ с автономной навигацией требуют минимального взаимодействия с КСС. При использовании автономной навигации основная часть навигационных задач решается на борту ИСЗ. Спутники в любой момент могут определять собственное местоположение и самостоятельно управлять бортовой аппаратурой без долгосрочного прогноза своего движения.

Преимущества автономной навигации отражены в российском радионавигационном плане [1]: «Для перспективных КА (космических аппаратов) различного целевого назначения предусматривается значительное повышение эффективности решения целевых задач с одновременным повышением автономности их функционирования. Это вызывает резкое возрастание требований к навигационному обеспечению (НО) КА, которые не могут быть обеспечены традиционными наземными средствами НО и требуют использования бортовых средств НО».

Традиционно средствами автономной навигации являлись инерциальные навигационные системы, чувствительные элементы которых, измеряя приращения углов и линейной скорости, позволяют определить все параметры ориентации и навигации. Однако любой, даже самой высокоточной инерциальной системе присуще накопление погрешностей траекторных измерений с течением времени. Накопление погрешностей приводит к тому, что работа инерциальных средств без коррекции не удовлетворяет требованиям по точности.

Решению задач автономной навигации ИСЗ посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей, среди которых выделяется монография [2], в которой рассматриваются методы решения задачи автономной навигации, методы обработки навигационной информации, методы оценивания достижимых показателей точности. В этом научном труде рассмотрены не только традиционные инерциальные, но и такие перспективные бортовые системы, как система навигации по магнитному полю Земли и системы, основанные на использовании орбитальных ориентиров и протяжённых наземных ориентиров.

Важно отметить, что авторы работы [2] указывают на то, что в их книге рассмотрены системы, созданные или исследованные в эпоху, предшествующую вводу в строй спутниковых радионавигационных систем. Такое упоминание спутниковой радионавигации как новой эпохи в создании навигационных систем для ИСЗ не случайно. Применение спутниковых радионавигационных систем (СРНС) привело к качественно новому уровню навигации наземных, воздушных и морских объектов за счет повышения точности, доступности, надежности и достоверности навигационной информации. Аналогичное повышение качества навигации ожидается от применения аппаратуры потребителей СРНС на борту ИСЗ. Согласно российскому радионавигационному плану [1] «навигационные приемники ГНС ГЛОНАСС становятся неотъемлемой частью бортового комплекса управления (БКУ) КА, информация от которых используется как для уточнения орбитальных параметров движения центра масс (ПДЦМ) КА, но и для планирования целевых задач в БКУ».

От внедрения СРНС на спутниках можно ожидать значительное снижение стоимости, потребляемой мощности и массы, а также расширение спектра выполняемых задач. Расширение спектра выполняемых задач достигается за счет того, что аппаратура потребителей СРНС способна без связи с наземными станциями определять в реальном масштабе времени не только местоположение ИСЗ, но и его скорость, угловое положение (ориентацию), точное время и расстояние до других спутников. Эти данные можно использовать при автономном планировании маневров и для удержания спутника на орбите, что существенно уменьшает эксплуатационные расходы. Среди других преимуществ СРНС, обеспечивающих бортовую автономию, отметим автономное временное обеспечение ИСЗ и автономное определение пространственной ориентации спутников. Таким образом, аппаратура потребителей СРНС, предназначенная для использования на борту ИСЗ, позволяет существенно повысить эффективность эксплуатации спутников за счет решения навигационной задачи без участия наземных систем управления. Мы будем называть аппаратуру потребителей

СРНС, предназначенную для использования на борту спутников, бортовой аппаратурой спутниковой навигации (БАСН).

На сегодняшний день как в России, так и за рубежом, накоплен богатый опыт проектирования и применения спутниковой радионавигации. Аппаратура потребителей, использующая американскую СРНС GPS и российскую СРНС ГЛОНАСС широко применяется сегодня для навигации наземных, воздушных и морских объектов. Однако создание БАСН является сложной научно-технической задачей, поскольку существующие СРНС не предназначены для использования на борту ИСЗ. Использование радионавигационных приемников на борту космических кораблей не получало развития по ряду причин. В их числе отсутствие опыта разработки БАСН у предприятий космической отрасли и сосредоточение носителей инженерно-технического ноу-хау на рынке аппаратуры спутниковой навигации массового применения. Но основной причиной, по которой БАСН пока не стала аппаратурой массового применения, является сложность научно-технических задач, которые нужно решить проектировщикам БАСН. Для создания БАСН необходимо решение задач радионавигации, статистической радиотехники, микроэлектроники, цифровой обработки сигналов и астрономии. Решение этих задач требует методологии проектирования БАСН. Методология проектирования БАСН должна представлять собой применяемый одновременно и во взаимной связи набор методов проектирования архитектуры БАСН, первичной и вторичной обработки сигналов в БАСН, а также методов решения задачи относительной навигации при помощи БАСН.

Таким образом, сложилась ситуация, при которой эффективность эксплуатации спутников оказывается весьма низкой. Под эффективностью эксплуатации следует понимать эксплуатационные расходы, стоимость спутников и их массу, спектр выполняемых задач и ряд других показателей.

Следовательно можно сформулировать в следующем виде **крупную научную проблему**, требующую решения. Это проблема повышения эффективности эксплуатации спутников за счет решения навигационной задачи без участия наземных систем управления путем применения БАСН.. Для решения

этой проблемы необходима разработка методологии проектирования БАСН и создание БАСН на основе этой методологии. Разработки методологии проектирования БАСН и создание БАСН открывает новую эру в освоении околоземного пространства. При этом обеспечивается высокоточное предсказание следа спутника на поверхности Земли и управление орбитой по заданному закону, что существенно снижает стоимость маневров. БАСН позволяет решить задачи предупреждения столкновений и минимизации нежелательного радиочастотного взаимодействия между спутниками за счет реализации планирования маневров и раннего упреждения. Использование автономной навигации при помощи БАСН обеспечивает уменьшение потребления ракетного топлива как при удержании спутника на орбите, так и при перестроении на орбите по разным причинам. Кроме того снижается стоимость и масса спутника за счет уменьшения размеров двигателей малой тяги и упрощения системы контроля и поддержания орбиты. Наконец, при использовании БАСН конечному потребителю может поставляться информация уже с набором эфемерид ИСЗ, что обеспечивает планирование научных исследований на основе знания, где и при каких условиях будут видны спутники.

Таким образом, разработка методологии проектирования БАСН и создание БАСН на основе этой методологии имеют важное хозяйственное значение.

В настоящее время методологии проектирования БАСН не существует не только в России, но и за рубежом, что определяет актуальность темы исследования диссертации. Актуальность задачи создания БАСН также определяется политическими аспектами. Исследователи из немецкого авиакосмического агентства отмечают экспортные ограничения на американские радионавигационные приемники космического базирования, проблемы с документацией и высокие затраты на их внедрение [3]. Если даже близкие союзники США озабочены созданием собственной технологии автономной навигации космических кораблей на основе СРНС, то российским ученым и российской промышленности и подавно необходимо в ближайшее время проектировать и производить отечественные БАСН.

Отдельные аспекты создания БАСН рассматривались в работах российских [4, 5] и зарубежных авторов [6, 7]. Следует, однако, сказать, что в перечисленных работах и исследованиях затрагиваются, как правило, лишь отдельные аспекты автономной навигации при помощи СРНС, не учитываются, например, такие сложности как взаимосвязь архитектуры приемника с методами первичной и вторичной обработки сигналов СРНС. Достаточно заметить, что до настоящего времени разработчики не имеют полноценного методического аппарата для проектирования БАСН. Таким образом, созрела необходимость создания методологии проектирования БАСН.

Указанные выше положения делают актуальной **проблему повышения эффективности эксплуатации искусственных спутников Земли путем применения БАСН за счет разработки методологии проектирования БАСН и создания БАСН на основе этой методологии.** Ее решению посвящена данная диссертационная работа.

Цель диссертационной работы – решение проблемы повышения эффективности эксплуатации искусственных спутников Земли при помощи СРНС на основании разработки методологии проектирования и технических средств, позволяющих решить навигационную задачу без участия наземных систем управления.

Для достижения сформулированной цели необходимо решить следующие **задачи диссертационной работы:**

1. Разработка архитектуры приемника спутниковой навигации на базе программного коррелятора, реализуемой на вычислительной платформе с низкопроизводительным центральным процессорным устройством (ЦПУ).
2. Разработка методов первичной и вторичной обработки сигналов СРНС, которые позволяют снизить требования к производительности ЦПУ.
3. Разработка методов первичной обработки сигналов СРНС, которые обеспечивают обнаружение сигналов в условиях широкого диапазона изменения доплеровского смещения частоты, а также обеспечивают

слежение за задержкой огибающей и фазой несущей частоты сигнала в условиях высокого уровня внутрисистемных помех.

4. Разработка метода вторичной обработки сигналов СРНС, который не предъявляет высоких требований к взаимному геометрическому расположению спутника-потребителя и навигационных спутников, в том числе обеспечивающего решение навигационной задачи в условиях, когда в зоне радиовидимости находятся не более трех навигационных спутников одновременно.
5. Разработка вычислительно эффективного метода относительной навигации по фазовым измерениям СРНС, который не использует модель ионосферных задержек прохождения сигнала СРНС в атмосфере и способен работать в условиях короткого времени прохождения навигационных спутников.

Методы исследования

Для решения задач исследования в диссертационной работе применялись теоретические и экспериментальные методы исследований. Теоретические методы включали теории проектирования цифровых и радиотехнических систем, методы статистической радиотехники, теории калмановской фильтрации и прикладной астрономии. Также использовались основные положения математической статистики, статистического анализа и линейной алгебры. Для проверки теоретических положений применено математическое моделирование и экспериментальные исследования при помощи имитаторов сигналов СРНС, а также натурные испытания в условиях космического полета.

Научная новизна проведенных исследований заключается в том, что в результате их выполнения:

- предложена архитектура приемника спутниковой навигации, отличающаяся динамически изменяемым числом каналов коррелятора, что позволяет реализовать многоканальную обработку сигналов на вычислительной платформе с низкопроизводительным ЦПУ;

- предложен метод поиска сигналов СРНС, отличающийся возможностью обнаружения сигналов в условиях широкого диапазона изменения доплеровского смещения частоты и при низких отношениях сигнал-шум;
- предложен вычислительно эффективный метод слежения за задержкой огибающей и фазой несущей частоты сигнала СРНС, отличающийся применимостью в условиях высокого уровня внутрисистемных помех;
- предложен вычислительно эффективный метод вторичной обработки сигналов СРНС, отличающийся тем, что делает возможным решение навигационной задачи в условиях, когда в зоне радиовидимости находятся не более трех навигационных спутников одновременно;
- предложен вычислительно эффективный метод относительной навигации по фазовым измерениям СРНС, отличающийся тем, что он может быть использован на борту низкоорбитальных спутников.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории обработки сигналов, теории проектирования аппаратуры цифровой обработки сигналов, методов определения орбит космических объектов и методов нелинейной фильтрации.

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты диссертационного исследования представляют собой методологию проектирования, которая может использоваться разработчиками БАСН при проектировании навигационных приемников, используемых для навигации ИСЗ. Разработанные в исследовании методы проектирования успешно реализованы в БАСН MosaicGNSS, которая прошла лётные испытания и находится в коммерческой эксплуатации.

В результате проведенных исследований получены следующие **основные научные положения, выносимые на защиту**:

1. методология проектирования БАСН, включающая в себя:
 - концепцию проектирования навигационной аппаратуры потребителей СРНС на основе программного коррелятора;

- архитектуру БАСН на основе низкопроизводительных ЦПУ космического исполнения;
 - метод проектирования БАСН на основе программного коррелятора.
2. Совокупность методов первичной обработки сигналов СРНС в БАСН, включающая в себя:
- метод поиска сигналов СРНС в БАСН, включающий алгоритм поиска сигналов и аналитические соотношения для расчета параметров поиска;
 - метод слежения за сигналами СРНС в БАСН, включающий вычислительно эффективный алгоритм слежения за параметрами сигналов в приемнике с программным коррелятором и аналитические зависимости параметров следящих систем от длительности интервала корреляции и соотношения уровней полезного сигнала и помехи.
3. Метод вторичной обработки сигналов СРНС в БАСН, включающий в себя:
- алгоритм решения задачи навигации ИСЗ по измерениям СРНС, в котором используются нелинейные уравнения динамики ИСЗ и применяется метод калмановской итерационной фильтрации на основе линеаризованного представления уравнений динамики и измеряемых параметров — дальностей и скоростей;
 - методику и рекомендации по применению алгоритма решения задачи навигации ИСЗ по измерениям СРНС.
4. Метод автономной относительной навигации ИСЗ при помощи БАСН, включающий в себя:
- алгоритм разрешения фазовой неоднозначности сигналов СРНС в БАСН;
 - методику и рекомендации по применению алгоритма разрешения фазовой неоднозначности сигналов СРНС в БАСН.
5. Результаты экспериментальных исследований, включающие в себя:

- результаты исследований на симуляторе сигналов СРНС алгоритмов решения задачи навигации ИСЗ по измерениям СРНС;
- результаты решения задачи относительной автономной навигации по данным полетного эксперимента спутников GRACE (двухчастотные измерения, база 250 км и одночастотные измерения, база менее 10 км);
- результаты полетных экспериментов БАСН MosaicGNSS на спутнике TerraSAR.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты диссертационных исследований использованы компанией EADS Astrium (Германия) при разработке БАСН MosaicGNSS [8]. MosaicGNSS прошла успешную проверку в ходе натурных испытаний приемника, проведенных немецким центром аэрокосмических исследований в рамках проекта TerraSAR-X [9]. В настоящее время на околоземной орбите функционирует 8 экземпляров БАСН с общим сроком службы 20 лет. Кроме того, имеется заказ на изготовление еще более 40 экземпляров MosaicGNSS для решения различных целевых задач на орбите [8]. Кроме того, научные результаты исследований нашли применение в разработках ООО «СофтНав», ООО «Рнав», ООО «ГЛОНАСС-Нева», о чем имеются соответствующие акты. Научные аспекты исследований также нашли отражение в практических учебно-методических материалах и используются в учебном процессе на кафедре бортовой радиоэлектронной аппаратуры Санкт-Петербургского университета аэрокосмического приборостроения при проведении занятий по дисциплине «Спутниковые радионавигационные системы», о чем имеется соответствующий акт.

Основные теоретические и практические результаты диссертации изложены в 46 публикациях, среди которых 2 монографии, 18 статей в изданиях, включенных в перечень ВАК, патент на изобретение, 2 зарегистрированные программы для ЭВМ и 23 выступления на российских и международных конференциях.

Структура и объем диссертационной работы.

Работа состоит из введения, 6 разделов, заключения, списка использованных источников, включающего 188 наименований, и двух приложений. Основная часть работы изложена на 399 страницах машинописного текста. Работа содержит 131 рисунок и 35 таблиц.

2. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность диссертации, определён предмет и цели исследований, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, а также кратко описано содержание диссертации по главам.

В первом разделе сформулированы суть и принципы автономной навигации ИСЗ. Рассмотрена постановка задачи автономной навигации, показано значение создания теоретических основ проектирования БАСН, обеспечивающих реализацию автономной навигации, и проанализированы требования к БАСН.

Рассмотрено значение автономной навигации искусственных спутников Земли и показана актуальность решения задачи автономной навигации. Обоснованы преимущества автономной навигации по сравнению с существующими способами навигации ИСЗ. Показано, что основные преимущества БАСН заключаются в повышении эффективности использования спутников, снижении эксплуатационных расходов спутниковых систем и предоставлении новых, до сих пор недоступных функциональных возможностей.

Проанализирован один из основных факторов, влияющих на БАСН, — космическая радиация, даны физические основы воздействия ионизирующих лучей на аппаратуру спутникового базирования.

Исследованы особенности космического базирования приемников СРНС и влияние этих особенностей на БАСН. Из анализа особенностей космического применения приемников СРНС следует, что использование СРНС на борту ИСЗ представляет собой сложную научно-техническую задачу из-за необходимости использования радиационно стойкой элементной базы для создания БАСН;

низкой производительности процессорных устройств космического базирования; низкого отношения сигнал/шум и плохих условий радиовидимости на борту геостационарных спутников; большого диапазона изменения частоты Доплера на борту низкоорбитальных спутников.

Главным результатом раздела 1 стали выявление и формулирование научно-технических задач, которые нужно решить для разработки методологии проектирования и создания БАСН, а также определение требований к БАСН гражданского применения. Следующие разделы посвящены решению сформулированных в этом разделе научно-технических задач и разработке методологии проектирования БАСН.

Во втором разделе исследована архитектура БАСН и проведен анализ способов построения радиационно стойкой бортовой аппаратуры спутниковой навигации.

В разделе приведено подробное описание решения задачи проектирования БАСН на основе доступных радиационно стойких электронных компонентов. Показана принципиальная возможность отказа от аппаратных корреляторов сигнала и построения БАСН на основе программного коррелятора. Доказанные преимущества предложенной архитектуры по сравнению с классической состоят в упрощении аппаратной части приемника, снижении времени и стоимости разработки, а также гибкости, адаптируемости и простоты легкость модификации.

Рассмотрена реализация предложенной архитектуры БАСН на базе программного коррелятора. Найдены методы реализации программного многоканального коррелятора (МКК), позволяющие в разы уменьшить число операций, необходимых для вычисления свертки, и снизить таким образом требования к производительности ЦПУ. Получена оценка суммарных потерь в предложенной архитектуре и показано, что потери в наихудшем случае составят 1,5 дБ.

Предложена архитектура программного МКК с переменным временем интегрирования. Проанализирован принцип работы МКК с переменным временем

интегрирования, который заключается в использовании неполного ансамбля входных отсчетов для вычисления корреляции входного сигнала с опорным.

Показано, что в приемниках с программным коррелятором использование неполного набора входных отсчетов может быть усовершенствовано таким образом, чтобы перераспределить потери между каналами МКК в зависимости от уровня принимаемых сигналов. Благодаря программной реализации МКК использование входных отсчетов в каждом канале коррелятора может осуществляться порциями с разной длительностью и периодичностью (метод SoftFkex). Допустимое количество пропущенных отсчетов в канале МКК определяется уровнем мощности принимаемого сигнала. В отличие от классической реализации приемников с программным МКК, в предложенной архитектуре добавлены два новых блока – измеритель загрузки процессора и блок управления коррелятором, позволяющие динамически изменять число каналов коррелятора в зависимости от условий приема сигналов. На основании альманаха системы, передаваемого в навигационном сообщении, и вектора состояния потребителя вычисляется набор навигационных спутников, находящихся в зоне радиовидимости БАСН. Решение об изменении числа каналов МКК и формировании списка назначенных НКА осуществляется в блоке назначения на каналы на основании данных о наборе видимых НКА, статусе канала (поиск/захват/слежение) и времени интегрирования для каждого из каналов. Измеритель загрузки ЦП вычисляет оценку среднего значения интервала времени, затрачиваемого сигнальным процессором на выполнение всех задач, за фиксированный интервал времени. По измеренному отношению сигнал/шум в блоке управления коррелятором вычисляется время интегрирования для каждого из каналов коррелятора, которое используется в МКК для вычисления свертки.

Проведен анализ характеристик квадратурных отсчетов на выходе МКК и получена зависимость отношения локального максимума автокорреляционной функции сигнала к глобальному от длительности интервала корреляции. Предложен метод, позволяющий в режиме когерентного слежения за фазой несущей частоты восстановить кросс-корреляционные свойства укороченной

псевдослучайной последовательности (ПСП). Таким образом, в разделе 2 разработан и детально описан метод проектирования архитектуры БАСН на основе доступных радиационно стойких электронных компонентов.

В третьем разделе исследованы методы первичной обработки сигналов СРНС с учетом особенностей космического базирования. В первой части раздела 3 представлен метод проектирования поиска сигналов в БАСН. Показано, что большой диапазон неопределенности по частоте Доплера и ограниченность вычислительных ресурсов на борту ИСЗ не позволяют использовать в общем случае методы параллельного или последовательного поиска сигналов. Из-за этого предложено использовать комбинированный поиск, где вместо одного типа поиска применяется несколько, при этом в каждый момент времени наиболее эффективный тип поиска выбирается автоматически на основании априорной информации о частоте Доплера.

Для обеспечения обнаружения сигнала в широком диапазоне по частоте и при пониженном уровне мощности полезного сигнала предложены четыре типа поиска: параллельный поиск по частоте с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ); допоиск после БПФ; последовательный поиск в стандартном и узком диапазонах изменения частоты.

Во всех схемах поиска обнаружение сигнала осуществляется с использованием процедуры усеченного последовательного анализа. Для процедуры усеченного последовательного анализа Вальда получена аналитическая зависимость вероятности ложной тревоги и пропуска сигнала от значения начального порога обнаружения и скорости его изменения (для частного случая, когда обработка сигнала ведется в квадратурных каналах и можно полагать, что квадратурные компоненты свертки входного сигнала с опорным являются независимыми нормально распределенными случайными величинами с единичной дисперсией). На основе этой аналитической зависимости разработан метод проектирования поиска сигналов СРНС в БАСН и получены параметры используемых схем поиска.

Во второй части раздела 3 предложены методы проектирования следящих систем в БАСН, построенной на основе программного коррелятора. Разработанный метод проектирования схемы слежения за задержкой (ССЗ) позволяет существенно снизить загрузку ЦПУ по сравнению с традиционным подходом за счет временного разделения работы петель слежения за несущей и огибающей сигнала СРНС. В целях экономии ресурсов ЦПУ в приемнике с программным МКК предлагается использовать один канал корреляции с временным разделением вычислений свертки с разными копиями ПСП. В режиме захвата для оценки задержки огибающей и ее производной используется полный набор квадратурных накоплений. В режиме слежения – только 10% квадратурных накоплений. При использовании комплексирования ССЗ и схемы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) увеличение случайной погрешности оценки задержки, обусловленное использованием одноканальной схемы и уменьшением числа накоплений при вычислении сигнала ошибки в режиме слежения, может быть компенсировано сужением шумовой полосы фильтра петли ССЗ без ухудшения ее динамических характеристик. Произведены расчеты параметров следящих цепей и даны рекомендации по выбору этих параметров.

Для этого метода проведен анализ влияния внутрисистемной помехи на оценку фазы ПСП при использовании неполного ансамбля отсчетов входного сигнала. Получены аналитические зависимости для флюктуационной погрешности и смещения оценки фазы ПСП от параметров помехи в наихудшей ситуации, когда доплеровские сдвиги полезного сигнала и помехи совпадают. Показано, что на практике при выборе минимальной длительности интервала, на котором осуществляется свертка входного и опорного сигналов, кроме отношения сигнал/шум необходимо учитывать влияние внутрисистемной помехи на величину оценки фазы ПСП при близких доплеровских сдвигах частоты полезного сигнала и помехи.

Проведен анализ характеристик системы слежения за несущей частотой в режиме ФАПЧ при использовании неполного ансамбля входных отсчетов. Показано, что характеристики ФАПЧ определяются двумя факторами:

увеличением флюктуационной погрешности оценки фазы из-за уменьшения интервала вычисления квадратурных составляющих свертки и снижением помехоустойчивости, вызванным ухудшением ортогональных свойств укороченной ПСП. Первый фактор является платой за увеличение числа каналов приема. Путем выбора значения отношения сигнал/шум, начиная с которого допускается использование неполного ансамбля отсчетов, может быть достигнут разумный компромисс между погрешностью оценки фазы несущей частоты и числом каналов слежения. Снижение помехоустойчивости системы ФАПЧ проявляется в увеличении флюктуационной погрешности и появлении смещения оценки фазы несущей частоты при наличии во входной смеси внутрисистемной помехи. Получены аналитические зависимости для погрешностей оценки фазы при воздействии на сигнал внутрисистемной помехи в наименее благоприятных условиях, когда доплеровские смещения несущих частот полезного и мешающего навигационных спутников совпадают. Показано, что система ФАПЧ остается устойчивой даже при этих условиях.

Кроме того, в разделе 3 исследована и решена задача оценки влияния внутрисистемной помехи на методы приема символов навигационного сообщения сигнала СРНС.

Таким образом, в разделе 3 разработан и детально описан метод проектирования первичной обработки сигналов СРНС в БАСН.

В четвертом разделе исследована вторичная обработка сигналов в БАСН. Особое внимание уделено решению навигационной задачи на борту высокоорбитальных спутников в условиях ограниченной радиовидимости. Разработан метод решения навигационной задачи, который не требует четырех и более навигационных спутников в зоне радиовидимости.

Благодаря сравнительно малому уровню неопределенности возмущений, действующих на СИСЗ, и наличию детально проработанной модели движения космических тел, наиболее перспективным способом решения навигационной задачи на борту СИСЗ является использование уравнений динамики его движения. В таком подходе используется вероятностное описание динамики ИСЗ

и погрешностей измерений, что позволяет сформулировать постановку задачи навигации ИСЗ по измерениям СРНС с позиций теории стохастического оценивания.

С расчетом на бортовую реализацию разработан субоптимальный метод решения поставленной задачи навигации ИСЗ по измерениям СРНС, в котором используются исходные нелинейные уравнения динамики СИСЗ и в то же время применяется метод калмановской итерационной фильтрации на основе линеаризованного представления уравнений динамики и измеряемых параметров — дальностей и скоростей.

Основу представленного метода решения составляет итерационный фильтр Калмана. Необходимость выполнения итераций обусловлена существенно нелинейной зависимостью измеряемых параметров — дальностей и радиальных скоростей — от координат и скоростей СИСЗ при значительной неопределенности последних. Вектор состояния, оцениваемый фильтром, включает векторы погрешностей координат и скоростей, параметр влияния солнечного света на движение спутника, а также вектор коррелированных погрешностей разностных измерений псевдодальностей. При этом с помощью стандартных соотношений калмановской фильтрации обрабатываются измерения, в которых дальности и радиальные скорости представляются в виде, линеаризованном относительно оценок, полученных на предыдущей итерации или, если это первая итерация, то относительно оценок прогноза. В ковариационных соотношениях ФК на этапе прогноза используются уравнения динамики ИСЗ, линеаризованные в точке, соответствующей оценкам координат и скорости на предыдущем шаге. Оценки прогноза координат и скорости вычисляются путем интегрирования нелинейных уравнений движения спутника, в качестве начальных условий берутся относящиеся к предыдущему моменту измерения значения координат и скоростей, скорректированные с учетом выработанных фильтром оценок для погрешностей прогноза координат и скоростей по измерениям, полученным на предшествующих шагах решения.

Показана эффективность модификации фильтра Калмана на основе *UD*-разложения. По сравнению с классическим вариантом *UD*-модификация более устойчива к вычислительным ошибкам, что особенно актуально для рассматриваемой задачи, где приходится сталкиваться с плохой обусловленностью ковариационной матрицы из-за редкого поступления измерений, а также малого количества и неблагоприятной геометрии расположения навигационных спутников.

Представлено подробное изложение операций, составляющих предложенный метод решения навигационной задачи в БАСН. Оно сопровождается всеми необходимыми пояснениями и обоснованиями.

Приведены результаты апробации предложенного метода решения навигационной задачи. Показана не только принципиальная пригодность метода для решения задачи навигации СИСЗ в составе БАСН, но и продемонстрировано, что потенциальная точность метода удовлетворяет точностным требованиям к БАСН.

Показано также, что предложенный метод свободен от недостатков существующих решений, т. е. полностью автономный и вычислительно эффективный, с одной стороны, и позволяющий оценивать координаты СИСЗ в условиях воздействия возмущающих факторов — с другой.

Кроме того, предложенный метод является универсальным: он может использоваться и в условиях избыточного состава измерений, например на низкоорбитных спутниках.

Таким образом, в разделе 4 разработан и детально описан метод проектирования вторичной обработки сигналов СРНС в БАСН.

В пятом разделе исследована относительная навигация космических кораблей при помощи СРНС. Задача относительной навигации возникает, в частности при решении проблемы высокоточных измерений гравитационного поля в труднодоступных районах Земли.

Рассмотрена постановка задачи автономной навигации группы спутников и показано, что для осуществления автономной относительной навигации

необходимо разработать метод определения вектора взаимного положения двух космических кораблей на борту (без связи с наземными станциями) и в реальном масштабе времени.

Проанализированы особенности автономной относительной навигации БАСН, показано, что к особенностям следует отнести невысокую эффективность фильтрационных методов обработки измерений и малую долю слабо коррелированных измерений фазы несущей, сложность учета ионосферных погрешностей для одночастотных приемников, а также ограниченность бортовых вычислительных ресурсов.

Показано, что кроме вычислительной эффективности метод решения задачи относительной навигации должен обладать способностью вырабатывать адекватные оценки погрешности полученного решения. Этого можно добиться, если сократить до приемлемого уровня риск получения ложного решения на этапе исключения неоднозначности фазовых измерений. Для этого необходимо располагать соответствующей характеристикой достоверности. Предложено вместо классических статистических критериев использовать апостериорную вероятность предполагаемого целочисленного значения, которая является наиболее объективным критерием исключения неоднозначности, поскольку опирается на всю полученную информацию. Если апостериорная вероятность достигает установленного заранее порога (близкого к единице), целочисленная оценка периодов используется для получения окончательного решения — относительных координат.

Обосновано преимущество предложенного метода по сравнению с существующими аналогами. Преимущество основано на разбиении фиксированного решения на два этапа и в более рациональной организации перебора целого числа периодов фазовых измерений. На первом этапе фиксированного решения отыскивается наиболее вероятное значение целого числа периодов фазы. Полный перебор целого числа периодов не выполняется. Высокая скорость выполнения этого этапа обеспечивается тем, что область, в которой производится поиск, постоянно сужается по мере нахождения новых

«кандидатов» на наиболее вероятное значение. Второй этап служит для оценки апостериорной вероятности найденного значения целого числа периодов. Существенно, что ее оценка формируется последовательно в ходе перебора возможных значений целого числа периодов. Причем величина оценки апостериорной вероятности монотонно убывает по мере учета новых целочисленных значений. Благодаря такой технике создается возможность отказаться от недостоверного фиксированного решения, не вычисляя полностью его апостериорную вероятность и не выполняя перебор всех возможных значений периодов фазы. В ходе выполнения перебора на первом и втором этапах применяется «автоматическая» нумерация значений компонент вектора периодов фазы, которая обеспечивается легко выполнимыми целочисленными операциями и не требует запоминания больших массивов данных. Кроме того, необходимое на первом и втором этапах вычисление квадратичных форм выполняется не с нуля для каждой новой комбинации целого числа периодов, а с учетом промежуточных результатов для уже рассмотренных комбинаций.

Представлено подробное изложение операций, составляющих предложенный метод решения задачи относительной навигации БАСН. Оно сопровождается всеми необходимыми пояснениями и обоснованиями.

Приедены результаты тестирования метода на реальных двухчастотных измерениях GPS, полученных на низкоорбитных европейских спутниках GRACE предназначенных для уточнения модели гравитационного поля Земли. Погрешность оценки относительных координат (расхождение с эталонным решением) находится на уровне 3...5 см. Также проведено моделирование одночастотного решения для на различных предполагаемых базах. Результаты моделирования показывают удовлетворительное качество оценки относительных координат на базах до 30 км.

Таким образом, в разделе 5 разработан и детально описан метод проектирования относительной навигации по сигналам СРНС в БАСН.

В шестом разделе представлены результаты внедрения методов из разделов 1–5 в БАСН MosaicGNSS. Описана БАСН MosaicGNSS и приведены результаты

испытания MosaicGNSS на борту немецкого спутника TerraSAR-X. В полетных испытаниях измерения Mosaic GNSS полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к точности определения орбиты спутника TerraSAR-X - среднеквадратическая погрешность (СКП) определения орбиты при помощи сырых измерений Mosaic GNSS не превышала 70 сантиметров. Раздел 6 позволяет сделать вывод о том, что создание бортовой аппаратуры спутниковой навигации MosaicGNSS путем использования разработанной методологии проектирования БАСН доказывает справедливость разработанной теории.

Кроме того, результаты проведенных летных испытаний подтверждают факт создания автономной системы спутниковой навигации и тем самым доказывают решение крупной научной проблемы — повышение эффективности эксплуатации искусственных спутников Земли.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проектирование БАСН — важная научно-техническая задача, решение которой требует междисциплинарных исследований по проектированию аппаратуры, радионавигации, статистической обработке сигналов, прикладной астрономии, цифровой обработке сигналов и физике космического пространства.

В работе систематизированы методы разработки БАСН и предложены практические решения, основанные на опыте создания успешно опробованной аппаратуры. Создание БАСН базировалось на разработанной методологии проектирования.

Проектирование БАСН, безусловно, будет развиваться: этого требует и логика развития космической отрасли, и складывающийся рынок космической радионавигации. Важно отметить, что БАСН пригодна как для абсолютной, так и для относительной навигации, она представляет собой недорогое устройство, которое при соответствующем алгоритмическом обеспечении может решить широкий спектр задач, таких как временное обеспечение ИСЗ, определение и контроль ориентации спутников. В итоге БАСН станет «сердцем» комплексной навигационной системы космических аппаратов, которая будет обеспечивать

определение местоположения, контроль параметров орбиты, контроль ориентации и координацию с другими спутниками внутри группировки.

Итогом диссертационной работы являются следующие научные и практические результаты:

- методология проектирования БАСН,
- методы первичной обработки сигналов СРНС в БАСН,
- методы вторичной обработки сигналов СРНС в БАСН,
- методы автономной относительной навигации в БАСН,
- результат применения предложенных методов проектирования – производимая массово БАСН MosaicGNSS.

Проведенные летные испытания БАСН подтвердили справедливость разработанной методологии проектирования и доказали реализацию автономной системы навигации искусственных спутников Земли, что безусловно позволяет утверждать, что решена крупная научная проблема – повышение эффективности использования искусственных спутников Земли.

Цитируемая литература

1. Радионавигационный план Российской Федерации [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.internavigation.ru/documents/RNP2011.doc> (дата обращения: 09.09.2015).
2. Аншаков, Г.П. Автономная навигация космических аппаратов / Г. П. Аншаков, А. Д. Голяков, В. Ф.Петрищев, В. А.Фурсов. — Самара: Изд-во ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», 2011. — 569 с.
3. Montenbruck, O. GNSS Receivers for Space Applications [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.iapg.bv.tum.de/mediadb/14973/14974/04_ACES_WS_08_SGNS_S.pdf (дата обращения: 09.09.2015).

4. Махненко, Ю. Ю. Экономически эффективные технологии навигации геостационарных спутников : дис. ... д-ра техн. наук : 05.07.09 / Махненко Юрий Юрьевич. — М., 2008. — 356 с.
5. Тучин, Д. А. Автономное определение параметров движения околоземного космического аппарата по измерениям спутниковых навигационных систем : дис.... канд. физ.-мат. Наук : 01.02.01 / Тучин Денис Андреевич. — М., 2004. — 111 с.
6. Wennersten, M. D., Baner, A. V., Boegner, G. J., Dougherty, L., et al. PiVoT GPS Receiver // Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2001). — Salt Lake City, UT, 2001. — P. 855–861.
7. TOPSTAR 3000 — An Enhanced GPS Receiver for Space Applications [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet104/gerner104.pdf> (дата обращения: 09.09.2015).
8. Mosaic GNSS Receiver LEO, MEO, GEO [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.space-airbusds.com/en/equipment/mosaicgnss-receiver.html> (дата обращения: 09.09.2015)
9. Yoon, Y. T., Eineder, M., Yague-Martinez, N., Montenbruck, O. TerraSAR-X precise trajectory estimation and quality assessment // Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. — 2009. — V. 47. — № 6. — P. 1859–1868.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации***Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России***

1. Михайлов, Н. В. Разработка опытного образца бортового спутникового приемника навигационного сигнала Galileo / Н. В. Михайлов, П. Краусс, С. Берберих, А. Л. Бочковский // Гироскопия и навигация. — 2002. — № 1. — С. 108–120.
2. Михайлов, Н. В. Автономная навигация космических кораблей с использованием GPS / Н. В. Михайлов, В. Ф. Михайлов, М. В. Васильев // Гироскопия и навигация. — 2008. — № 1. — С. 3–21.
3. Михайлов, Н. В. Метод разрешения неоднозначности фазовых измерений GPS при относительной навигации космических объектов / Н. В. Михайлов, В. Ф. Михайлов // Гироскопия и навигация. — 2008. — № 4. — С. 9–20.
4. Михайлов, Н. В. Методы первичной обработки сигналов в радионавигационных приемниках космического базирования / Н. В. Михайлов, В. Ф. Михайлов // Гироскопия и навигация. — 2009. — № 4. — С. 35–44.
5. Mikhailov, N. V. Autonomous satellite orbit determination using spaceborne GNSS receivers / N. V. Mikhailov, M. V. Vasil'ev // Gyroscopy and Navigation. — 2011. — V. 2. — № 1. — P. 1–9.
6. Михайлов, Н. В. Применение метода разрешения неоднозначности фазовых измерений GPS для относительной навигации космических кораблей / Н. В. Михайлов, В. Ф. Михайлов // Гироскопия и навигация. — 2009. — № 2. — С. 37–48.
7. Михайлов, Н. В. Автономное определение параметров орбиты искусственных спутников земли с использованием спутниковых радионавигационных систем / Н. В. Михайлов, М. В. Васильев, В. Ф. Михайлов // Гироскопия и навигация. — № 4. — 2010. — С. 41–52.

8. Mikhaylov, N. V. GPS/GLONASS receiver in land vehicle : Expectations and reality / N. V. Mikhaylov, A. L. Botchkovski, S. S. Pospelov // ITS Telecommunications (ITST) the 11th International Conference on Telecommunications for Intelligent Transport Systems. — 2011. — P. 287–292.
9. Михайлов, Н. В. Автономная относительная навигация космических кораблей при помощи одночастотного приемника сигналов GPS // Известия высших учебных заведений России. Приборостроение. — 2011. — № 8. — С. 71–77.
10. Михайлов, Н. В. Опыт проектирования совмещенного приемника GPS/ГЛОНАСС и результаты его предварительных испытаний / Н. В. Михайлов, А. Л. Бочковский, С. С. Пospelov // Гироскопия и навигация. — 2012. — № 1. — С. 3–13.
11. Михайлов, Н. В. Опыт использования метода Softflex в аппаратуре потребителей спутниковой навигации / Н. В. Михайлов, В. В. Чистяков // Гироскопия и навигация. — 2012. — № 4. — С. 105–111.
12. Михайлов, Н. В. Метод слежения за задержкой сигнала в бортовой аппаратуре спутниковой навигации с программным коррелятором / Н. В. Михайлов, В. В. Чистяков // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. — 2013. — № 5. — С. 60–66.
13. Михайлов, Н. В. Измерение радионавигационных параметров сигнала СРНС следящими системами без обратной связи в условиях многолучевого распространения / Н. В. Михайлов, Д. Е. Юдакин, П. В. Глушков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2013. — № 176. — С. 18–28.
14. Михайлов, Н. В. Метод определения координат и скорости геостационарного космического аппарата по измерениям спутниковых навигационных систем / Н. В. Михайлов, В. Ф. Михайлов // Успехи современной радиоэлектроники. — 2013. — № 2. — С. 113–121.

15. Михайлов, Н. В. Применение метода определения параметров орбиты геостационарного спутника Земли с использованием спутниковых радионавигационных систем / Н. В. Михайлов, В. Ф. Михайлов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. — 2013. — № 2. — С. 71–76.
16. Михайлов, Н. В. Методы поиска сигналов спутниковых навигационных систем в приемниках космического базирования. Ч. 1. Комбинированный поиск / Н. В. Михайлов, В. В. Чистяков // Гироскопия и навигация. — 2013. — № 4 (83). — С. 60–71.
17. Михайлов, Н. В. Методы поиска сигналов спутниковых навигационных систем в приемниках космического базирования. Ч. 2. Расчет параметров комбинированного поиска / Н. В. Михайлов, В. В. Чистяков // Гироскопия и навигация. — 2014. — № 1 (84). — С. 70–80.
18. Михайлов, Н. В. Решение задачи навигации для геостационарного космического аппарата на основе уравнений его динамики и эпизодических измерений от навигационных спутников / Н. В. Михайлов, Д. А. Кошаев // Гироскопия и навигация. — 2014. — № 4 (87). — С. 16–33.

Монографии

19. Михайлов, Н. В. Автономная навигация космических аппаратов при помощи спутниковых радионавигационных систем. — СПб.: Политехника, 2014. — 362 с.
20. Михайлов, Н. В. Приемники спутниковой навигации космического базирования: архитектура и первичная обработка сигналов / Н. В. Михайлов, В. В. Чистяков. — Воронеж: Изд-во «Научная книга», 2014. — 124 с.

Другие статьи и материалы конференций

21. Mikhailov, N. SoftFlex: An Advanced Approach to Design of GNSS Receiver with Software Correlator / A. Botchkovski, V. Chistyakov,

- M. Golubev, N. Mikhailov, S. Pospelov, M. Vasilyev, P. A. Krauss, W. Fichter, M. Mittnacht, E. Gottzein // Proceedings of the 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1999). — Nashville, TN, 1999. — P. 353–362.
22. Mikhaylov, N. V. “Soyuz”-“Mir” Orbital Flight GPS/GLONASS Experiment / N. V. Mikhaylov, M. V. Vasil'ev, S. V. Filatchenkov, S. Stishov, V. Branetc, S. N. Klushnikov et al. // Proceedings of the 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1999). — Nashville, TN, 1999. — P. 2303–2312.
23. Mikhaylov, N. V. “Soyuz”-“Mir” Orbital Flight GPS/GLONASS Experiment : First Results / S. Klyushnikov, S. Filatchenkov, N. Mikhailov, S. Pospelov, M. Vasilyev // Proceedings of the 6th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. — St. Petersburg, 1999. — P. 1–10.
24. Mikhaylov, N. MosaicGNSS : An embedded GPS Receiver for Space Applications / N. Mikhailov, W. Fichter, M. Bruder, E. Gottzein, P. A. Krauss, M. Mittnacht, A. Botchkovski, M. Vasilyev // Proceedings of the AAS/IFAC/ESA/ION International Workshop on Aerospace Applications of the GlobalPositioning System. Breckenridge. CO, USA, January 31 — February 2. — 2000.
25. Mikhaylov, N. GNSS Software Receivers: Recent Developments / N. Mikhailov, A. Botchkovski, S. Pospelov // Proceedings of 7th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. — St. Petersburg, May 2000. — P. 11–12.
26. Mikhaylov, N. V. Design of an embedded GPS receiver for space applications / N. V. Mikhaylov, P. Krauss, A. L. Bochkovski, M. Mittnacht, M. Bruder, M. V. Vasil'ev et al. // Space Technology. — 2001. — V. 20. — № 4. — P. 127–134.
27. Михайлов, Н. В. Разработка приемника навигационных сигналов системы Галилео / Н. В. Михайлов [и др.] // Материалы VIII Санкт-

- Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. — СПб. : ЦНИИ «Электроприбор», 2001. — С. 148.
28. Михайлов, Н. В. Высокоточная относительная навигация ИСЗ по спутникам системы GPS / Н. В. Михайлов, М. Миттнахт, М. Хартрампф, М. В. Васильев // Материалы IX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. — СПб. : ЦНИИ «Электроприбор», 2002. — С. 44.
29. Михайлов, Н. В. Автономная навигация космических кораблей с использованием GPS // Сборник материалов XIV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. — СПб. : ЦНИИ «Электроприбор», 2007. — С. 278–292.
30. Михайлов, Н. В. Автономная относительная навигация космических кораблей с использованием GPS / Н. В. Михайлов, В. Ф. Михайлов // Сборник материалов XV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. — СПб. : ЦНИИ «Электроприбор», 2008. — С. 288–303.
31. Михайлов, Н. В. Автоматизированное функциональное регрессионное тестирование GNSS приемников / Н. В. Михайлов, А. В. Никандров, П. С. Глушков, В. Ф. Михайлов // Материалы XVI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. — СПб. : ЦНИИ «Электроприбор», 2009. — С. 280–282.
32. Mikhaylov, N. V. Signal processing in spaceborne GNSS receivers / N. V. Mikhaylov, V. F. Mikhaylov // Proceedings of the 16th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS. — St. Petersburg, Russia, 2009. — P. 351–356.
33. Mikhailov, N. Methods for digital signal processing in space-based radionavigation receivers / N. V. Mikhailov, V. F. Mikhailov // Gyroscopy and Navigation. — 2010. — V. 1. — № 3. — P. 163–169.

34. Михайлов, Н. В. Автономное определение параметров орбиты искусственных спутников Земли с использованием спутниковых радионавигационных систем / Н. В. Михайлов, В. Ф. Михайлов // Сборник материалов XVII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. — СПб. : ЦНИИ «Электроприбор», 2010. — С. 337–347.
35. Mikhaylov, N. V. Measurement coprocessing of GNSS receiver and low cost inertial sensors / N. V. Mikhaylov, M. V. Vasilyev, D. A. Koshaev, N. V. Vasilyeva // Proceedings of the 18th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS. — St. Petersburg, Russia, 2011. — P. 235–237.
36. Mikhailov, N. V. Autonomous satellite orbit determination using spaceborne GNSS receivers / N. V. Mikhaylov, M. V. Vasil'ev // Gyroscopy and Navigation. — 2011. — V. 2. — № 1. — P. 1–9.
37. Mikhailov, N. V. Application of the ambiguity resolution method of phase GPS measurements for relative navigation of spacecraft / N. V. Mikhailov, V. F. Mikhailov // Gyroscopy and Navigation. — 2011. — V. 1. — № 1. — P. 2–9.
38. Михайлов, Н. В. Опыт использования метода SoftFlex в аппаратуре потребителей спутниковой навигации / Н. В. Михайлов, В. В. Чистяков // Материалы XIX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. — СПб. : ЦНИИ «Электроприбор», 2012. — С. 324–330.
39. Mikhailov, N. V. Signal Search Methods for Space Based GNSS Receivers. Part 1. Combined Search / Н. В. Михайлов, В. В. Чистяков // Gyroscopy and Navigation. — 2013. — V. 4. — № 4. — P. 60–71.
40. Mikhailov, N. V. The SoftFlex Approach in the User Equipment for Satellite Navigation : Examples of Application / Н. В. Михайлов, В. В. Чистяков // Gyroscopy and Navigation. — 2013. — V. 4. — P. 50–56.

41. Mikhaylov, N. V. Analysis of self-interference in tracking loops of GPS receivers / N. V. Mikhaylov, V. V. Chistyakov // 21st Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS. — St. Petersburg, Russia, 2014. — P. 450–452.
42. Mikhaylov N.V. Spacecraft positioning in a geostationary orbit using the model of its perturbed motion and the satellite navigation receiver / N. V. Mikhaylov, D. A. Koshaev // 21st Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS. — St. Petersburg, Russia, 2014. — P. 416–425.
43. Mikhailov, N. V. Signal Search Methods for Space Based GNSS Receivers. Part 2. Calculation of combined search parameters / N. V. Mikhailov, V. V. Chistyakov // Gyroscopy and Navigation. — 2014. — V. 5. — № 1. — P. 70–80.

Патент на изобретение

44. Пат. 2140090 Российская Федерация, МПК 6G01S1PФ G01S1/30, G01S5/12. Цифровой приемник спутниковой радионавигационной системы / Бочковский А. Л., Васильев М. В., Голубев М. А., Михайлов Н. В., Поспелов С. С., Чистяков В. В. ; заявитель и патентообладатель ООО «Софт Нав». — № 99104407/09 ; заявл. 12.03.99 ; опубл. 20.10.99. — 14 с. : 5 ил.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

45. Свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ 2011612743 Российская Федерация. Библиотека функций спутниковой навигации Spase / заявитель и правообладатель Н. В. Михайлов.; опубл. 06.04.11.
46. Свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ 990066 Российская Федерация. Комплекс встроенного программного обеспечения для навигационного приемника GPS на основе программного коррелятора / заявитель и правообладатель ООО «Софт Нав». — № 980694 ; опубл. 15.02.99.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве

Постановка задач исследований, планирование теоретических исследований и экспериментов, обработка данных и анализ полученных результатов, обобщение результатов в виде научных выводов и рекомендаций, интерпретация, изложение содержания работ в виде научных публикаций, апробация являются личным вкладом автора во все работы, выполненные в соавторстве.

Кроме того, личный вклад автора состоит в том, что в работах [1, 8, 10, 11, 21, 24-27, 38, 40, 44-46]

- предложена концепция приемника спутниковой навигации с динамически изменяемым числом каналов коррелятора на основе адаптивной обработки сигналов;
- проведено математическое моделирование и натурное макетирование, доказывающие эффективность и применимость предложенной архитектуры приемника;
- предложен метод восстановления кросс-корреляционных свойств псевдослучайной последовательности при помощи когерентного накопления квадратурных составляющих свертки на нескольких последовательных эпохах;
- для адаптивного метода обработки сигнала поставлена и решена задача оценивания потерь и получения защитных отношений для укороченных дальномерных кодов в зависимости от длительности интервала корреляции;
- предложенная архитектура внедрена в коммерческом приемнике космического базирования.

В работах [16, 17, 39, 43]

- собраны, проанализированы и обобщены данные по типам поиска сигналов в приемниках СРНС;
- поставлена задача исследований, заключающаяся в необходимости организации одновременной работе каналов слежения и параллельного поиска сигналов СРНС;

- получены аналитические зависимости для процедуры усеченного последовательного анализа Вальда;
- произведен численный расчет параметров поиска и обоснованы параметры поиска для БАСН;
- даны рекомендации по внедрению метода поиска сигналов в программное обеспечение БАСН.

В работах [4, 12, 13, 32, 33, 41]:

- исследованы методы слежения за задержкой сигнала и фазой несущей частоты в приемниках СРНС с программным коррелятором;
- показан механизм возникновения внутрисистемной помехи при использовании неполного числа отсчетов в программном корреляторе и поставлена задача оценки влияния переменного числа отсчетов корреляции на погрешности оценки фазы ПСП и фазы несущей частоты сигнала СРНС;
- получены оценки влияния переменного числа отсчетов корреляции на флюктуационную и систематическую погрешности оценки фазы ПСП и фазы несущей частоты сигнала СРНС;
- произведены численные расчеты погрешностей определения задержки огибающей и фазы несущей частоты, а также вероятности ошибки приема символов при использовании неполного числа отсчетов в программном корреляторе и обоснованы параметры схем слежения в БАСН;
- проведены исследования устойчивости ФАПЧ в при использовании неполного числа отсчетов в программном корреляторе.
- даны рекомендации по внедрению метода поиска сигналов в программное обеспечение БАСНж

В работах [2, 5, 7, 14, 15, 18, 22, 23, 29, 34, 36, 42]

- поставлена и решена задача навигации искусственного спутника Земли на основании уравнений динамического движения спутника и разработаны математические основы метода решения задачи навигации ИСЗ, в котором используются нелинейные уравнения динамики спутника и

применяется метод калмановской итерационной фильтрации на основе линейризованного представления уравнений динамики и измерений параметров сигнала СРНС;

- разработано и апробировано на моделях программное обеспечение, реализующее математические основы предложенного метода решения задачи навигации ИСЗ;
- обоснована возможность бортовой реализации метода вторичной обработки сигналов;
- произведено экспериментальное исследование предложенного метода вторичной обработки при помощи симулятора сигналов GPS.

В работах [3, 6, 9, 28, 30, 37]

- предложен метод относительной навигации ИСЗ, основанный на разрешении фазовой неоднозначности фазы несущей частоты сигнала СРНС;
- предложенный метод относительной навигации ИСЗ разработан и реализован в программном обеспечении;
- обоснована возможность бортовой реализации метода относительной навигации ИСЗ;
- произведено экспериментальное исследование предложенного метода относительной навигации ИСЗ на моделях и на реальных данных эксперимента GRACE.

В работе [20]

- показана необходимость оценки влияния внутрисистемной помехи на прием символов навигационной информации при адаптивной обработке сигналов СРНС;
- поставлена задача по разработке программного комплекса для исследования особенностей приема сигналов спутниковых навигационных систем в космосе;

- проанализированы, систематизированы и обобщены результаты математического моделирования условий приема сигналов спутниковых навигационных систем в космосе.

Подписано в печать 5.11.2015 Формат 60x84 1\16.
Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Заказ № 424.

Отпечатано с оригинал-макета автора
в редакционно-издательском центре ГУАП
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67