

На правах рукописи

Инчагов Юрий Михайлович

Разработка алгоритмов комплексной обработки информации от  
приёмника сигналов спутниковых радионавигационных систем и  
инерциальных навигационных систем

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

г. Москва – 2019 г.

Работа выполнена на кафедре Радиотехнических систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

**Научный руководитель**

**Шатилов Александр Юрьевич**

Кандидат технических наук

**Официальные оппоненты**

**Пудловский Владимир Борисович**

Кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник отдел 842  
НИО-8 ФГУП «ВНИИФТРИ»

**Поваляев Александр Александрович**

Доктор технических наук, профессор,  
зам. нач. 25 отд. комплексных исследований  
создания перспективных навигационно-  
геодезических технологий и систем на их  
основе АО «Российские космические  
системы»

**Ведущая организация**

ПАО «Арзамасское научно-  
производственное предприятие «ТЕМП-  
АВИА»

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ на  
заседании диссертационного совета Д 212.141.11 при Федеральном  
государственном бюджетном образовательном учреждении высшего  
образования «Московский государственный технический университет имени  
Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»,  
расположенный по адресу 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО МГТУ  
им. Н.Э. Баумана.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью  
учреждения, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская  
ул., д.5, стр.1, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.141.11  
ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_.  
Учёный секретарь

диссертационного совета д.т.н., проф.



И. Б. Власов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность темы исследования*

Область применения спутниковых радионавигационных систем (СРНС) непрерывно расширяется, и повышаются требования к аппаратуре потребителей (АП) СРНС по точности, по скорости выдачи первого навигационного решения, помехозащищённости, надёжности, непрерывности выдаваемых оценок навигационных параметров потребителя и другим показателям качества. В общем случае приемно-вычислительное устройство АП СРНС оценивает вектор координат и вектор скорости потребителя по принимаемым сигналам от среднеорбитальных СРНС.

АП СРНС на сегодняшний день является самой точной, технологичной, дешёвой и массово применяемой навигационной аппаратурой. Однако этой аппаратуре присущ ряд недостатков. Во-первых, АП СРНС не обладает автономностью. Это не позволяет обеспечить непрерывность выдачи оценок вектора координат и скорости потребителя в условиях затенения радиосигналов от навигационных космических аппаратов (НКА). Во-вторых, переотражение радионавигационных сигналов от тех же объектов городской застройки (многолучевость) снижает точность оценок навигационных параметров. В-третьих, без применения специальных алгоритмов, антенных систем или вспомогательных датчиков АП СРНС обладает низкой помехоустойчивостью из-за крайне низкого уровня мощности полезного сигнала на выходе приемной антенны (около  $10^{-16}$  Вт). В-четвертых, у АП СРНС низкий темп выдачи навигационной информации (менее 10 Гц), тогда как в ряде задач управления движущимися объектами требуется выдача оценок навигационных параметров с частотой более 10 Гц.

Перечисленных недостатков полностью лишены инерциальные навигационные системы (ИНС). В состав ИНС обычно входит инерциальный измерительный блок (ИИБ) и вычислитель. ИИБ состоит из трёхосевых акселерометров, измеряющих воздействующие на ИИБ ускорения, и трёхосевых гироскопов, измеряющих воздействующие на ИИБ угловые скорости. ИНС обладает автономностью выдачи оценок вектора координат и вектора скорости потребителя с высоким темпом (100 Гц и более), а также позволяет оценить ориентацию потребителя (углы крена, тангажа и рысканья). Однако для выдачи этих оценок необходима выставка ИНС в начальный момент времени по координатам и углам ориентации. По законам механики для получения вектора скорости и координат необходимо интегрировать измерения акселерометров, а для получения углов ориентации необходимо интегрировать измерения гироскопов. При таком интегрировании погрешности измерений ИИБ приводят к накапливанию погрешностей в оценках вектора координат, вектора скорости и углов ориентации.

В зависимости от физического принципа работы и технологии изготовления датчиков ИИБ существенно различаются величиной и характером погрешностей, диапазоном измеряемых значений, типом

выдаваемых измерений. Инерциальные измерительные блоки, сделанные по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), являются наиболее дешёвыми, компактными и массово применяемыми, однако являются наименее точными и приводят к ошибкам, нарастающим до сотен метров за единицы минут. ИИБ на основе кольцевых лазерных гироскопов (КЛГ) и, например, кварцевых акселерометров применяются в авиационных ИНС и обеспечивают скорость роста ошибки порядка 1 км за 1 час работы, однако это дорогие и громоздкие устройства.

Таким образом, ИНС не способна поддерживать длительное время точность, хотя бы близкую к точности АП СРНС, которая составляет единицы метров, а при использовании дифференциально-фазового режима RTK (от англ. *real time kinematic*) – единицы сантиметров.

АП СРНС и ИНС по отдельности не удовлетворяют предъявляемым требованиям к современной навигационной аппаратуре, однако совместная обработка информации позволяет снизить влияние недостатков каждой из навигационных систем на оценку навигационных параметров, и использовать их достоинства. Совместную обработку информации от измерителей, основанных на разных физических принципах, называют комплексированием измерителей. Навигационная система, которая получается в результате комплексирования АП СРНС и ИНС, называется инерциально-спутниковой навигационной системой (ИСНС).

Помимо выбора ИИБ существует возможность выбора типа измерений от АП СРНС. В зависимости от условий решаемой задачи можно использовать либо оценки псевдодальностей и псевдоскоростей, либо оценки вектора координат и вектора скорости. Оценки вектора координат и вектора скорости от АП СРНС доступны только при наличии измерений от не менее четырёх НКА. В ряде случаев из-за плотной городской застройки, горной местности или лесных массивов затенения радионавигационных сигналов в зоне видимости навигационного приёмника могут приводить к видимости не более трёх НКА. Такие алгоритмы широко освещены в литературе, однако анализ работы ИСНС при недостаточном количестве видимых НКА отсутствует.

Важной задачей после разработки интегрированной навигационной системы, является оценка её характеристик точности путем натурных испытаний. На сегодняшний день существуют несколько возможных подходов к проведению такой оценки:

1) имитация сигналов СРНС и измерений ИИБ в соответствии с истинной (эталонной) траекторией, подача этих сигналов на вход ИСНС, сравнение измеренных навигационных параметров с эталонными;

2) испытания ИСНС совместно с эталонной системой, при которых показания испытуемой ИСНС сравниваются с показаниями эталонной системы;

3) испытания ИСНС на комплексе, состоящем из поверенных динамических стендов и блока имитации радионавигационных сигналов (динамические стойки воспроизводят известную (эталонную) траекторию

движения, а блок имитации радионавигационных сигналов воспроизводит сигналы СРНС, параметры которых меняются в соответствии с этой эталонной траекторией).

Существенный недостаток первого подхода заключается в том, что имитация измерений ИИБ не гарантирует адекватности этих измерений реальным выходным сигналам используемых инерциальных датчиков. При этом сами датчики не охватываются испытаниями. К тому же, испытуемая ИСНС должна иметь функциональную возможность подачи имитируемых измерений ИИБ по внешнему интерфейсу.

Второй метод также имеет недостатки, связанные с необходимостью подтверждения характеристик точности эталонной системы.

Использование комплекса динамических стендов совместно с блоком имитации радионавигационных сигналов позволяет избежать описанных выше недостатков и дать наиболее полное метрологическое обоснование методике испытаний. Из открытых источников известно, что такого рода комплекс существует только на территории РФ в «Главном научном метрологическом центре». Однако при эксплуатации такого комплекса возникает ряд вопросов, связанных с обеспечением синхронизации между динамическими стендами и блоком имитации радионавигационных сигналов, с формированием эталонной траектории с учётом физических ограничений динамических стендов. Эти вопросы необходимо решить в соответствующей методике испытаний ИСНС, включив в неё технологии синхронизации оборудования, синтеза исходных сценариев движения и алгоритмы обработки результатов.

Ещё одной областью применения технологий инерциально-спутниковой навигации являются системы пешеходного счисления пути (PDR, от англ. *pedestrian dead reckoning*). В системах PDR применяются малогабаритные и недорогие, но грубые инерциальные датчики типа МЭМС, которые не позволяют напрямую решать уравнения инерциальной навигации из-за высокой скорости роста ошибок (сотни метров за единицы секунд). Для определения координат в системах PDR учитывают особенности движения пешехода: общий принцип заключается в подсчёте сделанных шагов, определении длины шага и определении направления сделанных шагов. Таким образом, при известных координатах начала движения, которые могут быть получены по СРНС, можно вычислить дальнейшую траекторию движения пешехода.

Важным аспектом при создании персонального навигационного устройства является вес, размер, энергопотребление и автономность. Увеличение количества используемых датчиков снижает энергоэффективность устройства, а использование привязки к плану помещения или радиометок требует наличия инфраструктуры и не обеспечивает автономность. Поэтому актуальной на сегодня задачей является создание таких алгоритмов PDR, которые обеспечивают автономность при минимальном количестве используемых датчиков.

Одним из направлений повышения точности ИСНС является применение алгоритмов оптимальной интерполяции вместо фильтрации. Интерполяционная оценка формируется для некоторого момента в прошлом в отличие от фильтрационной оценки, формирующейся синхронно с поступающими наблюдениями. Интерполяционная оценка может быть точнее, чем фильтрационная оценка, поскольку для формирования интерполяционной оценки используются дополнительные наблюдения из будущих моментов времени. Платой за точность в данном случае будет запаздывание оценки относительно текущего момента времени. Тем не менее, в ряде случаев такое запаздывание может быть допустимым.

Наиболее широко в настоящее время алгоритмы интерполяции применяются в ПО, предназначенном для постобработки измерений ИСНС. В результате постобработки можно выдать более точные (в десятки раз) оценки навигационных параметров. Например, у компании «NovAtel» существует специализированное ПО «WayPoint», однако алгоритм работы ПО неизвестен и не позволяет получать оценки навигационных характеристик с фиксированной задержкой в реальном времени. В работах приведены алгоритмы оптимальной линейной интерполяции, позволяющие работать в реальном времени. Они не охватывают нелинейных задач, тогда как на практике модели измерений и вектора состояния ИСНС, как правило, описываются нелинейными функциями. В открытой печати публикаций на тему оптимальной нелинейной интерполяции не было найдено, поэтому решение такой задачи представляется актуальным.

Таким образом, в настоящее время существует ряд *актуальных* научно-технических проблем, а именно:

- анализ точности оценок вектора координат, вектора скорости, углов ориентации в ИСНС при использовании измерений псевдодальностей и псевдоскоростей от 1...3 НКА;
- оценивание характеристик точности ИСНС на комплексе из динамических стендов и блока имитации радионавигационных сигналов;
- повышение эффективности алгоритмов PDR за счет минимизации числа используемых датчиков;
- разработка алгоритмов нелинейной интерполяции измерений с фиксированной задержкой для повышения точности оценок навигационных параметров в ИСНС.

**Объектом** диссертационного исследования является инерциально-спутниковая навигационная система, выполненная по схеме:

- с комплексированием измерений акселерометров и гироскопов с измерениями псевдодальностей и псевдоскоростей;
- с комплексированием измерений акселерометров, магнитометров, барометра с оценками вектора скорости и вектора координат.

**Целью работы** является повышение точности и непрерывности навигационных определений в приёмнике сигналов спутниковых радионавигационных систем в условиях затенений принимаемых сигналов за

счёт комплексирования с микромеханическими инерциальными датчиками движения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

– анализ существующих алгоритмов и схем комплексирования АП СРНС и ИНС;

– выбор метода комплексирования и синтез алгоритма комплексирования для решения задачи повышения точности и непрерывности выдаваемых оценок вектора координат, вектора скорости и углов ориентации при видимости менее 4 НКА;

– анализ и сравнение полученных характеристик по оценке вектора координат, вектора скорости и углов ориентации при использовании измерений псевдодальностей и псевдоскоростей от 1 НКА, 2 НКА, 3 НКА с режимом работы по 8 НКА и при отсутствии навигационных сигналов;

– синтез комплексного алгоритма пешеходной навигации при использовании измерений вектора координат и вектора скорости от АП СРНС и измерений от сокращенного набора инерциальных датчиков (исключается трехосевой гироскоп);

– анализ полученных характеристик алгоритма пешеходной навигации;

– разработка и проверка методики оценивания характеристик точности ИСНС на комплексе из динамических стендов и блока имитации радионавигационных сигналов

– разработка алгоритма оптимальной нелинейной интерполяции измерений с фиксированной задержкой для повышения точности оценок навигационных параметров в ИСНС.

Перечисленные задачи решались **методами** теории оптимальной фильтрации, теории статистического анализа радиотехнических систем, а также методами имитационного, натурного и полунатурного моделирования, прикладного программирования.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в:

– разработке нового алгоритма комплексирования АП СРНС и ИИБ по оценке вектора координат, вектора скорости и углов ориентации потребителя при использовании измерений псевдодальностей и псевдоскоростей от АП СРНС и измерений акселерометров и гироскопов с использованием модернизированного варианта комплексирования по динамическому уравнению вектора состояния;

– разработке нового алгоритма комплексирования АП СРНС, ИИБ, магнитометров и барометра по оценке вектора координат, вектора скорости и угла курса для пешеходной навигации при использовании оценок вектора координат и вектора скорости от АП СРНС и измерений акселерометров, магнитометров и барометра без использования измерений гироскопов;

– синтезе нового алгоритма оптимальной нелинейной интерполяции.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в следующем:

– разработанный алгоритм комплексирования АП СРНС и ИИБ по измерениям псевдодальностей и псевдоскоростей позволил снизить скорость роста ошибок координат в 3 раза, вектора скорости в 3 раза и углов ориентации в 5 раз за 80 секунд при использовании измерений только от 3 НКА по сравнению с алгоритмом, использующим измерения координат и вектора скорости;

– разработанный алгоритм комплексирования АП СРНС и ИИБ для задач пешеходной навигации обеспечивает точность счисления координат 2-10% от пройденного пути после пропадания радионавигационных сигналов, используя при этом сокращённый набор датчиков (только акселерометры и магнитометры), что снижает вычислительную сложность на 30 kFLOP за такт работы алгоритма и энергопотребление на 150 мВт, по сравнению с алгоритмами, обеспечивающими аналогичную точность, но дополнительно использующими датчики угловых скоростей;

– разработанная методика обеспечивает оценку погрешностей координат, вектора скорости и углов ориентации ИСНС с ИИБ типа МЭМС на комплексе, включающем блок имитации радионавигационных сигналов и динамические стенды;

– синтезированный алгоритм оптимальной нелинейной интерполяции с фиксированной задержкой на примере оценивания фазы сигнала СРНС позволяет снизить выборочное СКО ошибки фазы в 3 раза по сравнению с оптимальной фильтрационной оценкой (в ФАП 3 порядка) при задержке 100 мс.

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

1. Разработанный алгоритм комплексирования АП СРНС и ИИБ по измерениям псевдодальностей и псевдоскоростей позволил снизить скорость роста ошибок координат в 3 раза, вектора скорости в 3 раза и углов ориентации в 5 раз за 80 секунд при использовании измерений только от 3 НКА по сравнению с алгоритмом, использующим измерения координат и вектора скорости.

2. Разработанная методика обеспечивает оценку погрешностей координат, вектора скорости и углов ориентации ИСНС с ИИБ типа МЭМС на комплексе, включающем блок имитации радионавигационных сигналов и динамические стенды.

3. Разработанный алгоритм комплексирования АП СРНС и ИИБ для задач пешеходной навигации обеспечивает погрешность счисления координат менее 10% от пройденного пути после пропадания радионавигационных сигналов, используя при этом сокращенный набор датчиков (только акселерометры и магнитометры), что снижает вычислительную сложность на 300 kFLOP и энергопотребление на 150 мВт.

4. Синтезированный алгоритм оптимальной нелинейной интерполяции с фиксированной задержкой на примере оценивания фазы сигнала СРНС позволяет снизить выборочное СКО ошибки фазы в 3 раза по сравнению с

оптимальной фильтрационной оценкой (в ФАП 3 порядка) при задержке 100 мс

### ***Достоверность результатов работы***

Достоверность результатов работы подтверждается верификацией разработанных имитационных моделей и программного обеспечения по проверочным ситуациям, соответсвием теоретических результатов экспериментальным, а также соответсвием полученных результатов известным результатам в изученной литературе.

### ***Внедрение результатов работы***

Результаты диссертационной работы **внедрены** в пять ОКР и в одну НИР. Внедрение результатов работы и достигнутый при этом эффект подтверждаются соответствующими актами.

Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017617144 «Программа оценки точности навигационной аппаратуры потребителя на динамических сценариях».

### ***Аппробация результатов работы***

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

1. Двадцать первая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2015 г.).
2. Десятая Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные системы и задачи управления» (п. Домбай, 2015 г.).
3. Научно-техническая конференция «Радионавигационные технологии в приборостроении» (п. Небуг, 2015 г.).
4. Двадцать вторая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2016 г.).
5. Научно-техническая конференция «Радионавигационные технологии в приборостроении» (п. Небуг, 2016 г.).
6. Двадцать третья международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2017 г.).
7. Двадцать четвёртая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2018 г.).
8. Международный московский IEEE-семинар MWENT-2018 (г. Москва, 2018 г.).

### ***Структура и объём диссертации***

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 90 наименований и девяти приложений. Основная часть работы изложена на 110 страницах и содержит пять таблиц и 61 рисунок.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В **главе 1** представлен обзор существующих алгоритмов комплексирования АП СРНС и ИНС. Сформулирована постановка задачи синтеза алгоритма ИСНС по измерениям псевдодальностей и псевдоскоростей от АП СНС, кажущегося ускорения и угловой скорости от ИИБ. Для решения задачи синтеза предложено использовать расширенный фильтр Калмана (РФК). Методами теории оптимальной фильтрации синтезирован алгоритм комплексирования АП СРНС и ИНС с использованием измерений псевдодальностей  $\mathbf{y}_{\bar{R}}$  и псевдоскоростей  $\mathbf{y}_{\bar{V}}$  от АП СРНС и измерений акселерометров  $\mathbf{a}_{rpy}$  и гироскопов  $\boldsymbol{\omega}_{rpy}$  с использованием модифицированного варианта комплексирования по динамическому уравнению вектора состояния. Алгоритм решает задачу непрерывной выдачи оценок вектора координат  $\mathbf{X}_{ecef}$ , вектора скорости  $\mathbf{V}_{ecef}$  и углов ориентации  $R, P, Y$  потребителя. Для этого в алгоритме используется два РФК. С помощью одного РФК оцениваются погрешности ИИБ при наличии измерений от АП СРНС по вектору скорости, так как в нём аложена вся информация о динамике потребителя. Вектор координат потребителя оценивался во втором РФК. В частности, это позволило снизить вычислительную нагрузку за счёт меньшего размера вектора состояния первого РФК. Схема синтезированного алгоритма представлена на Рисунке 1.

При синтезе алгоритма для оценивания вектора скорости и углов ориентации был введен следующий вектор состояния

$$\mathbf{x} = \left| \begin{array}{cccccc} \left( \mathbf{V}_{ecef} \right)^T & \bar{V}^* & \left( \mathbf{q}_{rpy}^{ecef} \right)^T & \left( \mathbf{b}_g \right)^T & \left( \mathbf{b}_a \right)^T & \dots \\ \left( \mathbf{S}_g \right)^T & \left( \mathbf{S}_a \right)^T & \left( \vec{\mathbf{k}}^{A2G} \right)^T & \left( \vec{\mathbf{m}}_a \right)^T & \left( \vec{\mathbf{m}}_g \right)^T & \end{array} \right|, \quad (1)$$

где  $\mathbf{V}_{ecef}$  – вектор скорости в СК ЕCEF;  $\bar{V}^*$  – скорость смещения шкалы времени приёмника относительно шкалы времени системы;  $\mathbf{q}_{rpy}^{ecef}$  – ориентация потребителя, представленная через кватернион;  $\mathbf{b}_{g,a}$  – вектор смещение нулей гироскопов и акселерометров соответственно,  $\mathbf{S}_{g,a}$  – вnedиагональные элементы матрицы перекоса осей и масштабных коэффициентов гироскопов и акселерометров соответственно;  $\vec{\mathbf{k}}^{A2G}$  – вектор, составленный из диагональных и вnedиагональных элементов матрицы влияния линейных ускорений на смещения нулей гироскопов,  $\vec{\mathbf{m}}_{g,a}$

– вектор диагональных элементов матрицы перекоса осей и масштабных коэффициентов гироскопов и акселерометров соответственно.

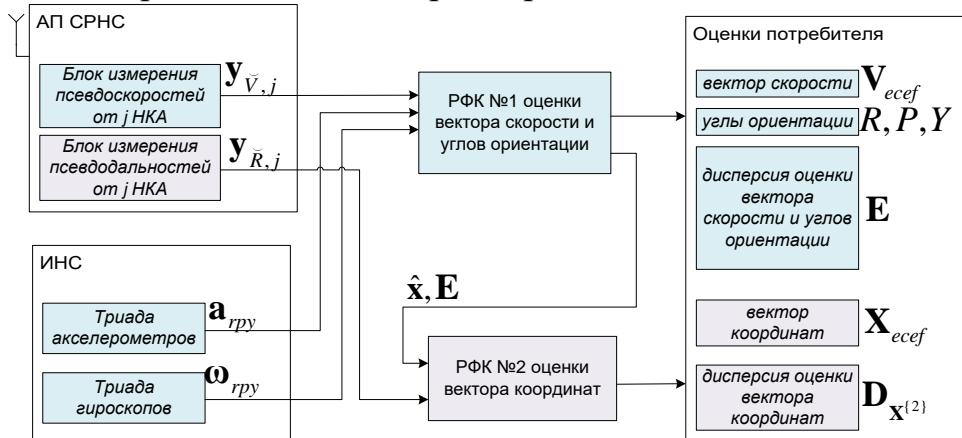


Рисунок 1. Структурная схема алгоритма комплексирования АП СРНС и ИНС с использованием измерений псевдодальностей и псевдоскоростей от АП СРНС и измерений акселерометров и гироскопов

При синтезе алгоритма оценивания вектора координат был введен следующий вектор состояния

$$\mathbf{X}^{\{2\}} = \begin{vmatrix} \mathbf{X}_{ecef}^T & \breve{\mathbf{R}}^T \end{vmatrix}^T, \quad (2)$$

где  $\breve{\mathbf{R}}$  – смещение ШВП относительно ШВС.

В главе 2 приведена методика и результаты имитационного моделирования синтезированного в главе 1 алгоритма. Выполнен анализ характеристик точности, полученных при пропадании навигационных сигналов: при использовании измерений псевдоскоростей и псевдодальностей от одного, двух и трёх НКА; при использовании измерений от всех (восьми) видимых НКА. На Рисунке 2 приведены графики среднеквадратического значения нормы погрешности трёхмерных координат при усреднении по 100 экспериментам, полученные при использовании измерений от разного количества НКА.

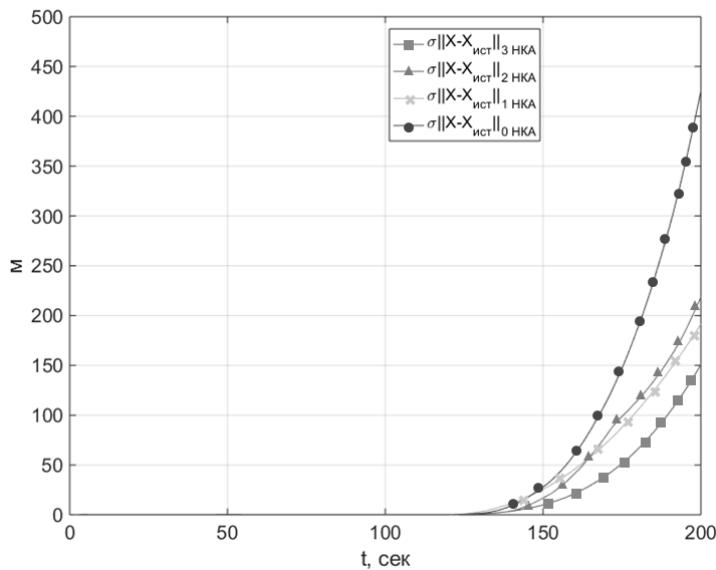


Рисунок 2. Среднеквадратическое значение нормы погрешности трёхмерных координат при усреднении по 100 экспериментам

Реализованный алгоритм позволил повысить точность оценки навигационных параметров по измерениям от недостаточного количества спутников. Например, точность оценок вектора координат по измерениям от трёх НКА за 80 секунд повысилась в 2,8 раза по сравнению с ситуацией, когда НКА отсутствуют совсем.

В главе 3 представлена разработанная методика по оценке характеристик точности ИСНС на комплексе из динамических стендов и блока имитации радионавигационных сигналов. На Рисунке 3 представлена схема комплекса.

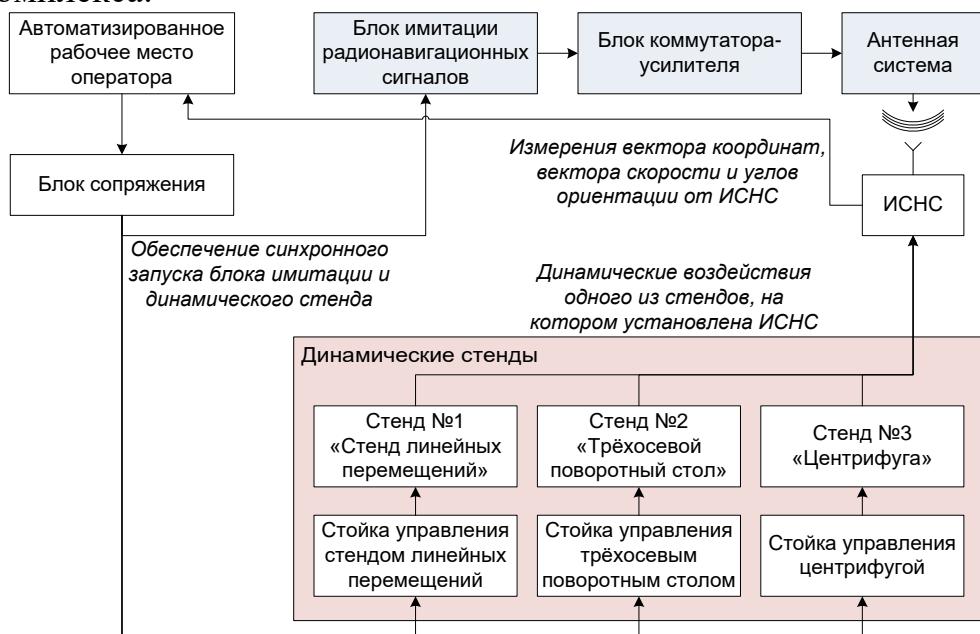


Рисунок 3. Схема комплекса по оценке точности характеристик ИСНС

Испытуемый блок ИСНС устанавливается на один из стендов. Блок ИСНС подключается к персональному компьютеру по цифровому интерфейсу для контроля и записи оценок вектора координат, вектора скорости, углов ориентации и других параметров.

Основная проблема при испытаниях ИСНС заключается в обеспечении соответствия и синхронности, подаваемых на вход ИСНС радионавигационных сигналов, формируемых блоком имитации, и динамических воздействий, формируемых динамическими стендами. Для решения проблемы соответствия радионавигационных сигналов и динамических воздействий необходимо, чтобы динамические воздействия в сценарии имитации и в сценарии движения динамического стенда были идентичны и известны.

По окончании испытаний с помощью подготовленной программы в среде MATLAB выполняется вычисление ошибок оценивания вектора координат, вектора скорости и углов ориентации испытуемой ИСНС, благодаря тому, что эталонные динамические воздействия известны.

Разработанная методика была верифицирована путем оценивания характеристик точности контрольной ИСНС «Novatel SPAN-CPT». При испытаниях ИСНС на комплексе норма вектора скорости не превышала 1 м/с

из-за ограничений динамического стенда. Полученные оценки были сопоставлены с оценками заявленными производителем в документации (см. Таблицу 1).

Таблица 1.  
Заявленные и оцененные характеристики точности ИСНС «Novatel SPAN-CPT»

Среднеквадратическая ошибка		Спецификация	Эксперимент
По координатам (м)	Горизонтальная составляющая	1,00	0,1102
	Вертикальная составляющая	0,60	0,1552
По скорости (м/с)	Горизонтальная составляющая	0,020	0,0228
	Вертикальная составляющая	0,010	0,0453
По углам ориентации (град.)	Угол крена	0,020	0,0288
	Угол тангажа	0,020	0,0402
	Угол курса	0,060	0,0982

Среднеквадратическое отклонение оценок вектора скорости и углов ориентации, полученные согласно разработанной методике испытаний ИСНС, в целом соответствуют заявленным производителем значениям. Расхождения в оценках точности координат связаны с отсутствием в сценарии имитации ионосферных и тропосферных погрешностей, погрешностей эфемеридно-временного обеспечения, тогда как они учтены в спецификации производителя.

В главе 4 был синтезирован новый алгоритм PDR с сокращённым набором измерений от ИИБ (без использования измерений гироскопов). Алгоритм пешеходного счисления пути состоит из двух фильтров Калмана. Один фильтр используется для оценки углов крена и тангажа, а второй фильтр используется для оценки угла направления шага. При синтезе алгоритма оценивания углов крена и тангажа был введён следующий вектор состояния

$$\mathbf{x}^{PDR} = |\mathbf{v} \quad \boldsymbol{\phi}|, \quad (3)$$

где  $\mathbf{v}$  – вектор скорости потребителя в системе координат (СК) север-восток-наз (NED) по измерениям ИИБ,  $\boldsymbol{\phi}$  – вектор, составленный из углов рысканья, тангажа и крена между осями СК NED и осями собственной СК (ССК) датчика соответственно.

Оцененные углы крена и тангажа позволяют повернуть измерения магнитометров из ССК в СК NED с точностью до угла рысканья. Так как мы не знаем о взаимном расположении устройства с ИИБ и потребителя, будем оценивать разницу между направлением шага  $\mathbf{H}^{magn}$  по измерениям магнитометров и направлением шага  $\mathbf{H}^{srns}$  по измерениям от АП СРНС. Оценка этой разницы необходима для того, чтобы корректировать направление шага от магнитометров в режиме PDR.

Была поставлена задача оценивания угла направления шага. Для этого был введён следующий вектор состояния

$$\mathbf{x}^{head} = |\mathbf{H}^{magn} \quad \Delta|, \quad (4)$$

где  $\Delta$  – поправка к направлению шага по измерениям магнитометров, возникающая из-за неопределённости взаимного расположения ИИБ и потребителя

$$\Delta = H^{srns} - H^{magn},$$

$$H^{srns} = \Delta + H^{magn}.$$
(5)

На Рисунке 4 представлена структурная схема разработанного алгоритма.

Для верификации разработанного алгоритма PDR, был разработан макет, состоящий из АП СРНС и ИИБ MPU9250. Разработанный алгоритм PDR был реализован на микроконтроллере, и была выполнена серия экспериментов. Для получения численных характеристик точности разработанного алгоритма в режиме автономного счисления в качестве эталонных координат использовались координаты от АП СРНС, а пропадания радионавигационных сигналов имитировались программно.

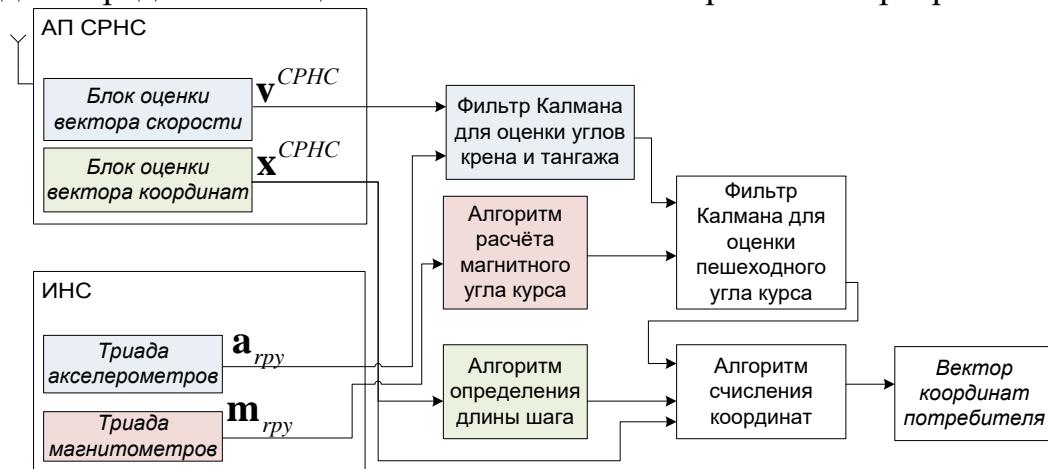


Рисунок 4. Структурная схема разработанного алгоритма PDR

На Рисунке 5 представлена оцененная траектория движения в одном из экспериментов, для которого погрешность составила 12 метров за 7 минут автономного режима счисления пути.

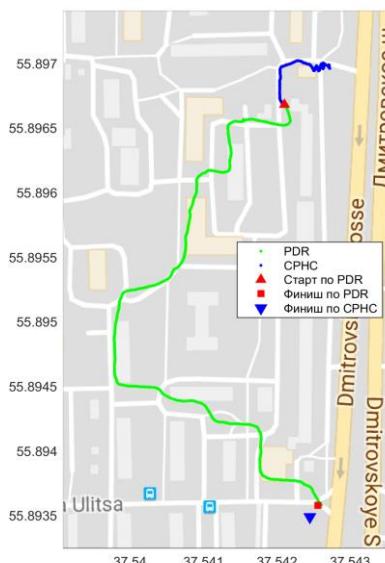


Рисунок 5. Экспериментальная проверка синтезированного алгоритма PDR

Разработанный алгоритм пешеходной навигации без использования измерений гироскопов позволил получить ошибку координат менее 10% от общего пройденного пути.

В главе 5 были выполнены постановка и решение задачи оптимальной нелинейной интерполяции с фиксированной задержкой. Оцениваемый марковский процесс задан нелинейным разностным уравнением

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{f}_{k-1}(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{g}_{k-1}(\mathbf{x}_{k-1}) \cdot \xi_{k-1}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{x}$  – вектор состояний размерности  $N$ ,  $k$  – текущий номер отсчёта в последовательности,  $k = 0, 1, 2, \dots$ ;  $\xi$  – вектор дискретных белых гауссовских шумов (ДБГШ) с нулевым мат. ожиданием и корреляционной матрицей  $\mathbf{D}_\xi$ ,  $\mathbf{f}_{k-1}(\mathbf{x}_{k-1}), \mathbf{g}_{k-1}(\mathbf{x}_{k-1})$  – известные нелинейные функции.

Наблюдения, содержащие информацию о процессе  $\mathbf{x}$ , описаны выражением

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{s}_k(\mathbf{x}_k) + \mathbf{n}_k, \quad (7)$$

где  $\mathbf{y}$  – вектор наблюдений размерностью  $M$ ,  $\mathbf{n}$  – вектор ДБГШ с нулевым мат. ожиданием и корреляционной матрицей  $\mathbf{D}_n$ ,  $\mathbf{s}_k(\mathbf{x}_k)$  – известная нелинейная сигнальная функция.

В задаче требуется сформировать байесовскую оценку процесса  $\mathbf{x}$  по критерию минимума дисперсии ошибки в момент времени

$$\nu = k - \delta, \quad (8)$$

где  $\delta$  – величина задержки, которая считается заданной.

В процессе вывода рекуррентных уравнений для моментов апостериорной плотности вероятности величины  $\mathbf{x}_v$  были встречены трудности, не позволившие выполнить строгий математический вывод рекуррентного алгоритма формирования оценки  $\hat{\mathbf{x}}_v$ . Был рассмотрен более простой случай нелинейной интерполяции при нелинейных наблюдениях и линейном процессе. В результате принятых упрощений были получены следующие уравнения

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{D}}_{\mathbf{x}_v} &= \mathbf{D}_\xi + \mathbf{F} \mathbf{D}_{\mathbf{x}_{v-1}} \mathbf{F}^T, \\ \mathbf{D}_{\mathbf{x}_v} &= \tilde{\mathbf{D}}_{\mathbf{x}_v} - \tilde{\mathbf{D}}_{\mathbf{x}_v} \mathbf{F}_1^T \mathbf{S}_1^T \left( \mathbf{D}_n + \mathbf{S}_1 \mathbf{D}_{\xi_v} \mathbf{S}_1^T + \mathbf{S}_1 \mathbf{F}_1 \tilde{\mathbf{D}}_{\mathbf{x}_v} \mathbf{F}_1^T \mathbf{S}_1^T \right)^{-1} \mathbf{S}_1 \mathbf{F}_1 \tilde{\mathbf{D}}_{\mathbf{x}_v}. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_v &= \mathbf{D}_{\mathbf{x}_v} \left( \mathbf{D}_\xi + \mathbf{F} \mathbf{D}_{\mathbf{x}_{v-1}} \mathbf{F}^T \right)^{-1} \mathbf{F} \hat{\mathbf{x}}_{v-1} + \\ &+ \mathbf{D}_{\mathbf{x}_v} \mathbf{F}_1^T \mathbf{S}_1^T \left( \mathbf{D}_n + \mathbf{S}_1 \mathbf{D}_{\xi_v} \mathbf{S}_1^T \right)^{-1} (\mathbf{y}_k - \mathbf{s}_k + \mathbf{S}_1 \hat{\mathbf{x}}_k). \end{aligned} \quad (10)$$

На рисунке 6 представлено сравнение фильтрационной оценки и оценки нелинейной интерполяции (при линейном процессе и нелинейных наблюдениях) в задаче оценивания трёхкомпонентного марковского процесса

$$\begin{aligned}
\Phi_k &= \Phi_{k-1} + \omega_{k-1} T, \\
\omega_k &= \omega_{k-1} + a_{k-1} T, \\
a_k &= a_{k-1} \cdot e^{-\alpha T} + \xi_{k-1},
\end{aligned} \tag{11}$$

где  $T = 10$  мс – шаг дискретизации;  $\alpha = 0,01$  (1/с) – ширина спектра флюктуаций компоненты  $a_k$ ;  $\xi_{k-1}$  – ДБГШ с нулевым матожиданием и дисперсией  $\sigma_a^2(1 - e^{-2\alpha T})$ ,  $\ldots = 15$ .

$$\mathbf{x} = \begin{vmatrix} \Phi \\ \omega \\ a \end{vmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{vmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & e^{-\alpha T} \end{vmatrix}, \quad \xi = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \xi \end{vmatrix}, \quad \mathbf{D}_\xi = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_a^2(1 - e^{-2\alpha T}) \end{vmatrix}. \tag{12}$$

Модель наблюдений была задана в виде

$$y_k = a \cdot \sin(\omega_0 k T + \Phi_k) + n_k, \tag{13}$$

где  $a = 1$  – амплитуда (отношение сигнал/шум 30 дБГц),  $n_k$  – ДБГШ с нулевым мат. ожиданием и СКО  $\sqrt{D_n} = 0.0093$ .

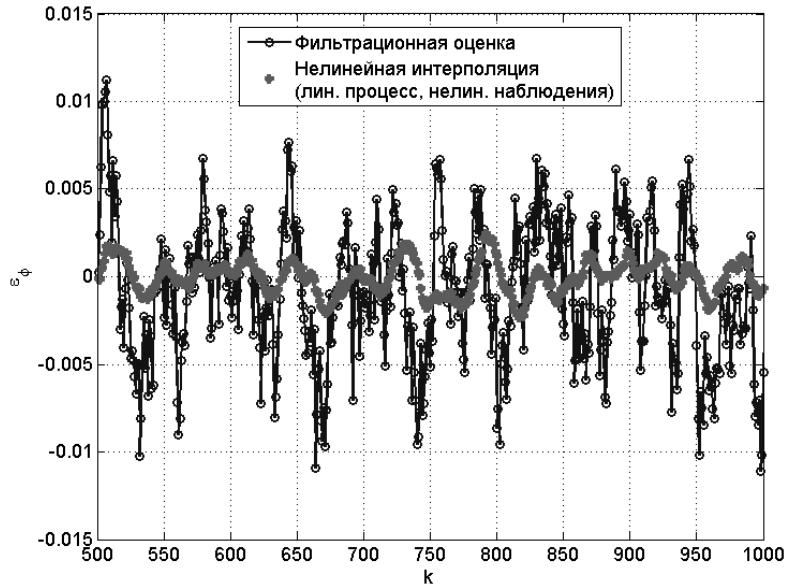


Рисунок 6. Сравнение фильтрационной оценки и оценки нелинейной интерполяции (при линейном процессе и нелинейных наблюдениях) с задержкой 10 тактов

Использование алгоритма нелинейной интерполяции с задержкой на 10 тактов позволило уменьшить выборочное СКО в два раза при сравнении с фильтрационной оценкой.

### Заключение

1. Синтезирован алгоритм комплексирования АП СРНС и ИНС с использованием измерений псевдодальностей и псевдоскоростей, акселерометров и гироскопов. Для автомобильной траектории движения с частыми поворотами синтезированный алгоритм позволил увеличить

точность определения вектора координат в 2,8 раза при использовании измерений от 3 НКА в течение 80 секунд по сравнению с работой ИСНС при полном пропадании сигналов от НКА. Такой анализ не проводился для известных из литературы алгоритмов. Возможны улучшения представленного алгоритма за счёт представления ориентации потребителя не кватернионом, а вектором вращения, совершенствования алгоритма контроля качества измерений от НКА.

2. Разработана методика оценивания ошибок ИСНС с использованием блока имитации радионавигационных сигналов и динамических стендов, формирующих эталонную траекторию движения. Разработанная методика была верифицирована по контрольной ИСНС с известными характеристиками Novatel SPAN-CPT. Особенность разработанной методики заключается в обеспечении синхронности и повторяемости формируемого блоком имитации радионавигационного поля и соответствующего ему динамического воздействия, формируемого динамическими стендами.

3. Синтезирован алгоритм комплексирования оценок вектора координат и вектора скорости от АП СРНС и измерений акселерометров, магнитометров и барометра для задач пешеходной навигации (PDR). В синтезированном алгоритме для оценки курса движения и вектора координат пешехода не используются измерения гироскопов. Разработанный алгоритм пешеходной навигации без использования измерений гироскопов позволил получить ошибку координат менее 10% от общего пройденного пути. Эти результаты соответствуют результатам, описанным в рассмотренной литературе, при этом в синтезированном алгоритме используется меньший набор датчиков, что позволило добиться большей вычислительной и энергетической эффективности. Для повышения точности оценок вектора координат для задач пешеходной навигации можно разработать алгоритм комплексирования АП СРНС и ИНС с использованием измерений псевдодальностей и псевдоскоростей от АП СРНС.

4. Разработан алгоритм оптимальной нелинейной интерполяции с фиксированной задержкой при нелинейных наблюдениях и линейном процессе. На примере слежения за фазой сигнала показано, что использование алгоритма нелинейной интерполяции с задержкой на 10 тактов позволило уменьшить среднеквадратическую ошибку слежения в два раза по сравнению с алгоритмом фильтрации. В качестве дальнейшей перспективы развития в данном направлении можно рассматривать синтез и анализ алгоритма нелинейной интерполяции применительно к ИСНС.

#### *Список работ, опубликованных по теме диссертации*

1. Инчагов Ю.М., Шатилов А.Ю. Синтеза слабосвязанного алгоритма комплексирования НАП СРНС и ИНС, работающего по наблюдениям псевдодальностей и псевдоскоростей от НКА // Радиотехника. М.: Радиотехника, 2017. №11. С. 22-32. (0.6 п.л. / 0.4 п.л.).

2. Инчагов Ю.М., Шатилов А.Ю., Нагин И.А. Методика оценивания погрешностей инерциально-спутниковых навигационных систем // Известия

тульского государственного университета. Технические науки / Тульский государственный университет, 2015. №11-2. С. 197-208. (0.7 п.л. / 0.6 п.л.).

3. Инчагов Ю.М., Нагин И.А. Результаты испытаний алгоритма пешеходного счисления пути по инерциальным датчикам с использованием барометра и магнитометров в условиях пропадания сигнала СРНС. // Радионавигационные технологии. / Под ред. А.И. Перова. М.: Радиотехника, 2017. №6. С. 100-106. (0.4 п.л. / 0.3 п.л.).

4. Результаты моделирования и испытаний слабосвязанного алгоритма комплексирования датчиков / Шатилов А.Ю. [и др.] // Радиотехника, 2017. №6. С. 85-92. (0.4 п.л. / 0.1 п.л.).

5. Шатилов А.Ю., Инчагов Ю.М. Оптимальная интерполяция с фиксированной задержкой // Радионавигационные технологии. / Под ред. А.И. Перова. М.: Радиотехника, 2017. №6. С. 26-32. (0.4 п.л. / 0.2 п.л.).

6. Инчагов Ю.М., Нагин И.А., Шатилов А.Ю. Алгоритм пешеходного счисления пути по инерциальным датчикам в условиях пропадания сигнала спутниковых радионавигационных систем // Радионавигационные технологии. / Под ред. А.И. Перова. М.: Радиотехника, 2016. №5. С. 41-46. (0.3 п.л. / 0.2 п.л.).

7. Методика оценки погрешностей ИСНС на базе испытательной аппаратуры ОКР «Инерция» / Инчагов Ю.М. [и др.] // Радионавигационные технологии. Выпуск 4 / Под ред. А.И. Перова. М.: Радиотехника, 2015. С. 85-89 (0.3 п.л. / 0.2 п.л.).

8. Инчагов Ю.М., Перов А.И. Методика оценки погрешностей чувствительности ИСНС на базе динамических стендов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. Докл. XXI Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. С. 102 (0.1 п.л. / 0.1 п.л.).

9. Инчагов Ю.М., Шатилов А.Ю. Алгоритм пешеходного счисления пути по инерциальным датчикам в условиях пропадания сигнала СРНС // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. Докл. XXII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. М.: Издательский дом МЭИ, 2016, С. 99 (0.1 п.л. / 0.1 п.л.).

10. Инчагов Ю.М., Шатилов А.Ю. Алгоритм оптимальной интерполяции // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. Докл. XXIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. М.: Издательский дом МЭИ, 2017, С. 98 (0.1 п.л. / 0.1 п.л.).

11. Инчагов Ю.М., Шатилов А.Ю. Моделирование работы спутниковой радионавигационной системы с поддержкой от инерциальной навигационной системы при недостаточном количестве навигационных спутников // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. Докл. XXIV Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. М.: Издательский дом МЭИ, 2018, С. 89, (0.1 п.л. / 0.1 п.л.).