

На правах рукописи



Кушнир Алексей Александрович

ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ НАВИГАЦИОННОЙ
АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЯ ГНСС НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ
МНОГОСИГНАЛЬНОГО ПРИЕМА

05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Автореферат на соискание

ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Власов Игорь Борисович

Официальные оппоненты: **Малышев Вениамин Васильевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой 604 Московского авиационного института (национальный исследовательский университет)

Булавский Николай Тадеушевич, кандидат технических наук, заместитель генерального директора, начальник отделения перспективных разработок и развития навигационных технологий АО «КБ НАВИС»

Ведущая организация АО «Аэроприбор-Восход»

Защита состоится «17» мая 2021 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.11 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1, зал Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «___» 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.141.11 д.т.н., проф.



Власов
Игорь Борисович

Общая характеристика работы

Спутниковая радионавигация является одной из важнейших высоких технологий, обеспечивающих информационную независимость и безопасность государства. Важной особенностью современных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС, GPS, Beidou, Galileo, является малая (порядка минус 160 дБВт) мощность спутникового сигнала вблизи поверхности земли, что соответствует отношению его мощности P_c к спектральной плотности шума приемника N_0 на входе приемника навигационной аппаратуры потребителя (НАП) порядка 40 дБГц. Как правило, НАП работает в условиях воздействия помех, соответственно, ключевой характеристикой НАП является ее *помехоустойчивость* (ПУ), т.е. минимальное отношение сигнал-шум, при котором обеспечивается возможность решать поставленные задачи с *заданным качеством*. Обычно для НАП задают максимально допустимое среднеквадратическое отклонение (СКО) оценок навигационных параметров (НП), которое во многом зависит от архитектуры построения систем слежения НАП. В большинстве навигационных приемников ПУ определяется характеристиками системы слежения за фазами несущих сигналов, точность оценивания которых напрямую не влияют на итоговую точность НВО, за исключением специальных фазовых приемников. В работе, под критерием качества понимается способность системы фазовой автоподстройки (ФАП) устойчиво (без срывов сопровождения) осуществлять оценку фаз сигналов.

Актуальность темы диссертации. Задачи повышения ПУ, а также точности навигационно-временных определений (НВО), была и остается приоритетной на всех этапах развития спутниковой навигации. За счет использования более совершенных алгоритмов фильтрации НП на этапе вторичной обработки, может быть повышена точность НВО. Однако повысить помехоустойчивость, совершенствуя только алгоритмы вторичной обработки, невозможно. Существует научно-техническая проблема оптимального синтеза и анализа методов и алгоритмов многосигнальной (совместной) обработки сигналов навигационных космических аппаратов (НКА) и создания, на их основе, высокоточной помехозащищенной НАП, реализуемой по классической двухэтапной схеме. Актуальность данной проблемы определяется отсутствием публикаций, посвященных особенностям и результатам синтеза оптимальных алгоритмов совместного слежения за сигналами НКА в НАП, реализующей двухэтапную схему НВО, а также отсутствием исследований возможности дальнейшего повышения помехоустойчивости и точности фильтрации информативных параметров сигнала.

Степень разработанности проблемы. До недавнего времени алгоритмы НВО развивались применительно к традиционному подходу, который делит процесс НВО на два этапа: на этапе *первичной* обработки, с помощью автономных систем слежения, оцениваются радионавигационные параметры (РНП): псевдозадержка, псевдофаза и доплеровский сдвиг частоты сигнала, принятого от каждого НКА. На этапе *вторичной* обработки, оценки РНП

используются при решении системы уравнений относительно навигационных параметров (НП): псевдодальности, псевдоскорости и т.д., дающей оценки искомых координат потребителя и времени. Практически вся современная НАП, выпускаемая промышленностью, реализует описанный *двухэтапный* принцип обработки сигналов.

В настоящее время основное внимание исследователей уделяется более совершенным, «одноэтапными» алгоритмам, реализующих комплексный фильтр, который обеспечивает *совместную* (многосигнальную) обработку сигналов от группы или всех наблюдаемых НКА, и формирование НВО - оценку НП.

Существенно, что совместная «многосигнальная» обработка позволяет уменьшить итоговую дисперсию оценки фильтруемой фазы, что эквивалентно увеличению энергопотенциала или повышению ПУ, примерно пропорционально числу объединяемых сигналов, как показывают исследования.

В литературе описан ряд алгоритмов многосигнальной обработки (VDLL, Со-ор Tracking), рассчитанных на реализацию в рамках двухэтапной схемы. Однако эти предложения являются эвристическими, (не вытекают из какого-либо оптимального синтеза) и, соответственно, не гарантируют реализацию всех преимуществ, многосигнальной обработки. Их потенциальные характеристики, а также влияние различных факторов на точность фильтрации РНП, исследованы недостаточно.

Кроме того, многосигнальная фильтрация может обеспечить ряд дополнительных преимуществ, например, - при решении проблемы, связанной с неоднозначностью результатов слежения за фазой сигнала. Как показано в диссертации, при использовании многосигнальной системы слежения за фазами сигналов, выигрыш в вероятности правильного разрешения неоднозначности, по сравнению с автономными ФАП, нарастает пропорционально числу объединяемых сигналов.

При обработке совокупности множества сигналов, с использованием алгоритмов многосигнальной фильтрации, возникает задача селекции «аномальных» сигналов, способных при включении в обрабатываемый массив ухудшить результат совместной обработки сигналов. По своей постановке, эта задача аналогична задачам, решаемым системой автономного контроля целостности (RAIM), имеющейся в стандартной НАП, однако функции RAIM относятся к этапу вторичной обработки и практически не влияют на помехоустойчивость НАП. Поэтому в диссертации задача обнаружения аномалий решается непосредственно в процессе работы многосигнальной системы фазовой автоподстройки, далее называемой «МФАП».

Таким образом, необходимость проработки неисследованных до сих пор теоретических вопросов, связанных с синтезом и анализом оптимальных и квазиоптимальных методов и алгоритмов многосигнальной (совместной) фазовой обработки сигналов НКА, а также создания на их основе высокоточной помехоустойчивой НАП, реализованной по классической (двухэтапной) схеме,

реализующей основные преимущества *одноэтапной* обработки сигналов, определяет актуальность диссертации.

Целью работы является синтез и анализ методов и алгоритмов совместной обработки множества навигационных сигналов, обеспечивающих повышение помехоустойчивости и точности НАП.

Задачи, решаемые в диссертации. Для достижения поставленной цели, в диссертации решены следующие задачи:

1) Проведен анализ методов повышения помехоустойчивости и точности НАП.

2) Выполнен синтез следующих алгоритмов совместного слежения за фазами сигналов:

— оптимальный алгоритм многосигнальной системы ФАП (МФАП);

— квазиоптимальный алгоритм МФАП по «сопряженной» задаче;

— квазиоптимальный алгоритм МФАП с разделением составляющих фаз сигналов по динамике их изменения;

— квазиоптимальный робастный алгоритм МФАП.

3) Разработано программно-математическое обеспечение для исследования алгоритмов МФАП методами статистического моделирования.

4) По результатам имитационного моделирования проведен анализ потенциальных характеристик помехоустойчивости и точности синтезированных алгоритмов.

5) Обосновано использование МФАП в качестве средства повышения помехоустойчивости и точности оценивания фаз навигационных сигналов.

6) Рассмотрены преимущества использования оценок фаз МФАП по сравнению с автономными ФАП в схемах оценки РНП с разрешением неоднозначности, а также при относительных измерениях (ОИ).

7) Разработаны и исследованы алгоритмы обнаружения, в том числе - непараметрические, предназначенные для селекции «аномальных» сигналов, которые могут понизить помехоустойчивость схемы МФАП.

8) Разработаны структурные схемы устройств, позволяющие реализовать полученные алгоритмы совместного слежения за фазами сигналов ГНСС, в современной НАП, построенной по двухэтапному принципу.

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

Научная новизна результатов исследования. Научная новизна полученных в диссертации результатов, состоит в следующем:

1) Впервые, с привлечением аппарата стохастических уравнений, синтезирован:

— оптимальный алгоритм совместной фильтрации фаз сигналов, принимаемых от одного или нескольких источников (навигационных спутников);

— *квазиоптимальный* алгоритм, позволяющий существенного упростить расчет коэффициентов расширенного фильтра Калмана (РФК) благодаря допущению о том, что динамика изменения параметров фазы практически полностью определяется динамикой объекта и нестабильностью частоты его ОГ;

— *квазиоптимальный робастный* алгоритм, позволяющих снизить размерность фильтра за счет использования априорной информации о различии в динамике составляющих ошибок, обусловленных нестабильностью ОГ и собственным движением объекта, а также ряд других упрощенных алгоритмов МФАП.

2) Получена оценка эффективности разработанных алгоритмов МФАП по сравнению с автономной ФАП.

3) На основе МФАП разработаны структурные схемы реализации алгоритма первичной обработки сигналов в НАП.

4) Разработаны алгоритмы и схемы селекции аномальных сигналов, исключаемых из числа совместно обрабатываемых МФАП.

На защиту выносятся:

1) Результаты синтеза:

— оптимального алгоритма многосигнальной системы ФАП;

— квазиоптимального алгоритма многосигнальной системы ФАП;

— квазиоптимального робастного и других упрощенных алгоритмов многосигнальной системы ФАП.

2) Результаты исследований синтезированных алгоритмов.

3) Разработанный алгоритм селекции сигналов, включаемых в совместную обработку МФАП.

4) Разработанные структурные схемы алгоритмов первичной обработки НАП на основе МФАП, а также устройства селекции сигналов.

Достоверность результатов диссертации обеспечена:

— корректной постановкой задач исследований;

— точными аналитическими решениями, использованными при получении ряда результатов;

— обоснованным выбором объема статистического эксперимента.

Достоверность подтверждается хорошим согласованием теоретических выводов с результатами, полученными в процессе экспериментальных исследований, в том числе - путем математического моделирования.

Практическая ценность работы:

1) Обосновано использование МФАП в качестве средства повышения помехоустойчивости и точности навигационно-временных определений.

2) Разработано программно-математическое обеспечение для исследования разработанных алгоритмов методами статистического моделирования.

3) Подтверждена эффективность фазовых методов совместной обработки навигационных сигналов, полученных как от одного, так и от нескольких НКА, в том числе различных ГНСС.

4) Предложены структурные схемы применения алгоритмов совместной фильтрации фаз сигналов ГНСС в аппаратуре, построенной по двухэтапному принципу обработки.

5) Разработан алгоритм селекции «аномальных» сигналов, включение которых в массив совместно обрабатываемых МФАП, может привести к росту дисперсии оценок и снижению потенциальной помехоустойчивости МФАП, а также рассмотрены вопросы схемной реализации такого алгоритма.

Реализация и внедрение результатов исследования. Результаты диссертации использованы при проведении ряда НИОКР выполненных с участием автора в ОАО «ВНИИР-Прогресс» в 2013-2015 гг. СЧ НИР «Свертка-В», СЧ НИР «Развитие-ВНИИР-Э4» и в НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2017г. СЧ ОКР «ГЛОНАСС-КК-Н-МРЛ-А-МГТУ», в 2018 г. СЧ НИР «Вызов-Перспектива-23»), что подтверждено соответствующими актами о внедрении.

Апробация результатов. По материалам диссертации сделано 4 доклада на научно-технических семинарах и конференциях, в том числе: на V молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии», ОАО «Радиофизика», (Москва, 2007 г.); на XIV международной научно-технической конференции «Радиолокация, радионавигация, связь», (Воронеж, 2008 г.); на научно-технических конференциях «Радиооптические технологии в приборостроении», (п. Небуг, Краснодарский край, 2007, 2013 г.г.).

Личный вклад автора. Основная часть работы была выполнена автором лично. В постановке задачи исследований и обсуждении его результатов участвовали И.Б. Власов, В.Н. Харисов, А.В. Пельтин, А.В. Шувалов. Проверка разработанных алгоритмов МФАП по реальным сигналам ГНСС на основе программного приемника в среде MATLAB проводилась при участии А.В. Пельтина.

Публикации. Результаты диссертационной работы изложены в 14 научных работах, в том числе 5 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Основная часть работы изложена на 135 страницах, содержит 4 таблицы, 41 рисунок и список литературы из 81 наименования.

Основное содержание работы

Введение содержит общую характеристику проблемы и обоснование актуальности выбранной темы. Констатируется, что ключевой характеристикой НАП является ее *помехоустойчивость*, т.е. минимальное отношение сигнал-шум, при котором обеспечивается требуемая точность навигационных определений. Отмечается, что ключевым элементом НАП, определяющим ее помехоустойчивость, является система слежения за фазами сигналов.

Первая глава диссертации посвящена обзору отечественных и зарубежных работ по вопросам совместной (многосигнальной) обработки сигналов, в том числе в аппаратуре, построенной в рамках традиционной (двуэтапной) схемы. Анализируются достоинства и недостатки известных

(эвристических) вариантов построения многосигнальных схем слежения за огибающей и фазой радионавигационного сигнала.

Важным шагом развития идеи многосигнальной обработки стала работа, посвященная синтезу оптимального алгоритма определения координат подвижного объекта при одновременном использовании N синхронных источников излучения. Следующим шагом к сближению решений, применяемых на практике, с оптимальными, стала *система объединенной синхронизации* (СОС), осуществляющая оптимальную оценку задержки сигнала $\tau_i(t)$ на основе совместного использования информации о значениях задержек огибающей и фазы высокочастотного колебания. С учетом ограничений, несущественных для радионавигации, СОС широко используется в современной НАП. Анализ отечественных и зарубежных публикаций подтвердили перспективность алгоритмов, предусматривающих объединенную обработку оценок РНП наблюдаемых спутников, что позволяет приблизить *точность оценок* к потенциальной.

За последние два десятилетия было опубликовано множество работ, посвященных синтезу и анализу систем совместного слежения за задержкой огибающей кодовой последовательности и фазой высокочастотного заполнения, предназначенных для реализации, как в одноэтапном, так и двухэтапном вариантах.

Из зарубежных работ широко известна статья, описывающая векторный алгоритм слежения за задержками кодовых последовательностей сигналов НКА. Предложенный алгоритм, названный «векторной системой слежения за задержками» (Vector Delay Lock Loop, VDLL), получил затем развитие в ряде работ, среди которых весьма удачная и заслуживающая отдельного внимания работа, описывающая алгоритм совместной оценки фаз сигналов, названный «Co-Op Tracking».

Вторая глава посвящена синтезу оптимального в рамках локальной гауссовой аппроксимации и квазиоптимальных алгоритмов МФАП применительно к широко используемой на практике двухэтапной схеме обработки, а также анализу ряда особенностей использования этих алгоритмов совместно с другими решениями, применяемыми в такой аппаратуре.

В разделе 2.1 обосновывается возможность применения в задачах анализа и синтеза МФАП стандартной модели функции сигналов на входе антенны НАП в виде линейной (в силу малости слагаемых) комбинации всех сигналов, принимаемых от НКА на фоне белого гауссова шума (БГШ):

$$S(t) = \sum_{i=1}^m s_i(t) + n(t), \quad (1)$$

где $s_i(t) = A_i G_{\text{дк},i}(t - \tau_i(t)) G_{\text{нс},i}(t - \tau_i(t)) \cos(\omega_i(t - \tau_{\text{д},i}(t)))$ - модель сигнала, формируемого НКА, $\tau_{\text{д},i}(t) = \tau_i(t) - \tilde{\varphi}_{0i} / \omega_i$.

При постановке задачи синтеза учитывалась важная особенность модели времени в ГНСС, связанная с тем, что в НВО одновременно с системной шкалой времени (СШВ) участвуют еще две бортовые шкалы - спутниковая и

потребительская, базирующиеся на опорных генераторах, не синхронизированных с СШВ. Возникающие в результате случайные временные сдвиги, прямо влияющие на точность НВО, в общем случае должны учитываться при синтезе и анализе соответствующих алгоритмов.

Для описания времени распространения сигнала i -го НКА в шкале времени приемника используется выражение

$$\tilde{\tau}_i(t_R) = \frac{\|\mathbf{x}_{ti}(t_R - \tau_i) - \mathbf{x}(t_R)\|}{c} + \delta_{ti} + \Delta_t(t_R), \quad (2)$$

которое учитывает составляющие задержки сигнала в процессе распространения δ_{ti} , связанное с ионосферной δ_{ion} и тропосферной δ_{tr} составляющими рефракции, а также – задержку δ_{mp} , обусловленную многолучевым распространением сигнала в точке приема.

В случае оценки фазы несущей сигнала

$$\tilde{\varphi}_i(t_R) = -\frac{2\pi}{\lambda_i} \left(\frac{\|\mathbf{x}_{ti}(t_R - \tau_i) - \mathbf{x}(t_R)\|}{c} + \Delta_t(t_R) \right) + \tilde{\varphi}_{0i}, \quad (3)$$

составляющая задержки $\delta_{t,i}$ переходит в составляющую фазы $\tilde{\varphi}_{0,i} = -\frac{2\pi}{\lambda} \delta_{t,i}$.

С учетом перечисленных допущений, далее, в рамках локальной гауссовой аппроксимации АПВ, решается задача синтеза алгоритмов многосигнальной ФАП, соответствующих критерию минимума СКО оценки фазы.

В разделе 2.2 решается задача синтеза оптимального алгоритма МФАП.

При выводе используется предположение, что полную фазу сигнала φ_i можно представить в виде суммы двух составляющих, имеющих различную природу и динамику

$$\varphi_i = \varphi_{x,i} + \varphi_{0,i}. \quad (4)$$

Здесь и далее: $\varphi_{x,i}$ - составляющая фазы, определяемая общими для всех наблюдаемых сигналов факторами - нестабильностью опорного генератора приемника и законом изменения координат (движения) носителя НАП (потребителя), именуемая *общей*; $\varphi_{0,i}$ - случайная составляющая дополнительных фазовых искажений сигнала, относящаяся к конкретному НКА, зависящая от таких факторов, как среда распространения, начальная фаза бортового формирователя, ФЧХ приемной антенны в зависимости от направления и т.п., называемая далее *индивидуальной*.

Таким образом, итоговая модель динамики фазы сигналов определяется заданными моделями динамики ОГ НАП, и вектора скорости потребителя; в качестве модели динамики для индивидуальных составляющих вектора предложено использовать простейший винеровский процесс с равномерным на интервале $(0; 2\pi)$ начальным распределением.

Используя уравнения оптимальной фильтрации в дискретном времени, получены уравнения фильтрации вектора состояния $\lambda = [\Phi^T, V_x^T]^T$, описывающие оптимальный алгоритм МФАП:

$$\begin{aligned} \hat{\Phi}_t &= \tilde{\Phi}_t + \mathbf{R}_{\varphi\varphi} \mathbf{u}_{\text{д}\varphi}, & \tilde{\mathbf{R}}_{\lambda,t} &= \Phi_\lambda \mathbf{R}_{\lambda,t-1} \Phi_\lambda^T + \mathbf{D}_\lambda, \\ \tilde{\Phi}_t &= \hat{\Phi}_{t-1} + \Phi_{\varphi V} \hat{\mathbf{V}}_{t-1} - \frac{\mathbf{F}_0}{c} \mathbf{V}_{\text{tr}} h & (5) \quad & (6) \\ \hat{\mathbf{V}}_t &= \Phi_{VV} \hat{\mathbf{V}}_{t-1} + \mathbf{R}_{\varphi V} \mathbf{u}_{\text{д}\varphi} & \mathbf{R}_{\lambda,t} &= \tilde{\mathbf{R}}_{\lambda,t} + \frac{\tilde{\mathbf{R}}_{\lambda,t} \mathbf{H}_{\lambda,t}^T}{(\mathbf{H}_{\lambda,t} \tilde{\mathbf{R}}_{\lambda,t} \mathbf{H}_{\lambda,t}^T + \mathbf{N}_{0,t})} \mathbf{H}_{\lambda,t} \tilde{\mathbf{R}}_{\lambda,t} \end{aligned}$$

На основании (4), (5) получена структурная схема алгоритма МФАП, представленная на Рисунке 1.

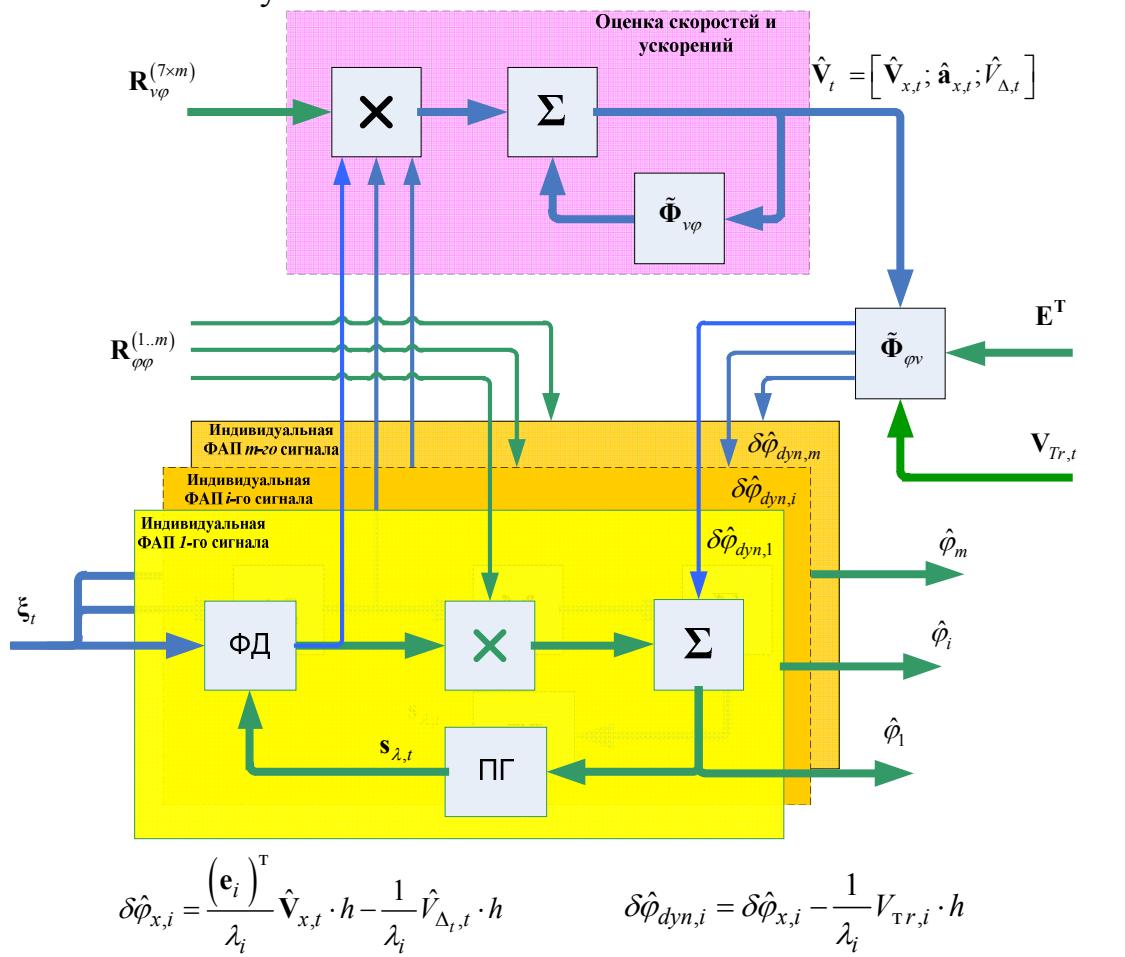


Рис.1. Структурная схема алгоритма МФАП

Характерной особенностью схемы МФАП является наличие m индивидуальных контуров слежения за индивидуальными составляющими фаз сигналов $\Phi_{0,t}$ каждого из принимаемых сигналов НКА, и одного общего контура слежения - за общей составляющей приращений фаз сигналов $\delta\hat{\varphi}_{dyn,i}$, получаемых на основании оценки вектора \mathbf{V}_t . Эта оценка осуществляется с привлечением информации из блока вторичной обработки о векторе направляющих косинусов \mathbf{E} и векторе радиальных компонент скоростей НКА

$\mathbf{V}_{Tr,t}$. Коэффициенты фильтров рассчитываются на основании решения уравнения Риккати, размерность которого $(m+7) \times (m+7)$.

Однако практическое использование полученного оптимального алгоритма, при большом числе сигналов m , может приводить к вырожденному решению уравнения Риккати.

В разделе 2.3 в качестве одного из вариантов решения данной проблемы в работе решена упрощенная («сопряженная») задача синтеза МФАП, получена структурная схема алгоритма, приведенная на Рисунке 2.

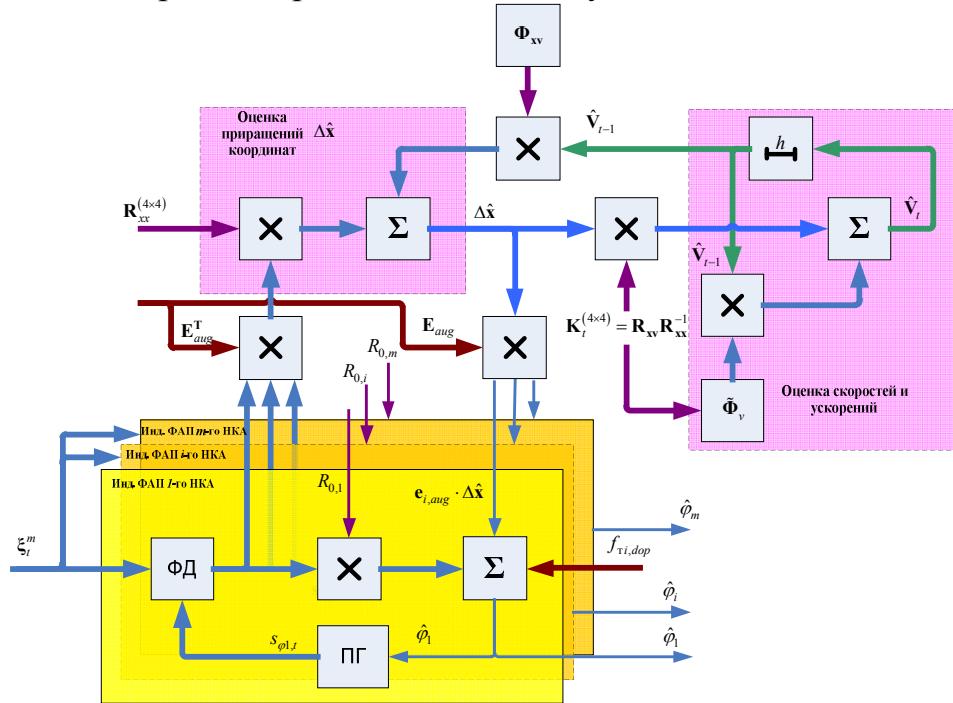


Рис.2. Структурная схема квазиоптимального алгоритма МФАП

Как следует из Рисунка 2, основу структурной схемы МФАП для «сопряженной» задачи также составляют m схем индивидуальных ФАП, работающих параллельно по каждому из принимаемых сигналов, и одной общей петли слежения - за общей составляющей приращений фаз сигналов. Отличительной особенностью схемы является расчет приращения общей составляющей фазы на основании приращений компонент вектора $\mathbf{x} = [x, y, z, \Delta]^T$.

$$\Delta\hat{\Phi}_{\mathbf{x},t} = \mathbf{E}_{aug} \Delta\hat{\mathbf{x}}_t \quad (7)$$

где \mathbf{E}_{aug} - матрица направляющих косинусов.

Рассмотрение «сопряженной» задачи позволило перейти от вектора оцениваемых параметров $\lambda = [\Phi^T, V_x, V_y, V_z, V_\Delta, a_x, a_y, a_z]^T$ к имеющему более простую структуру вектору $\mu = [x, y, z, \Delta, V_x, V_y, V_z, V_\Delta, a_x, a_y, a_z]^T$. Отметим, что размерность корреляционной матрицы ошибок фильтрации в данном случае не зависит от числа сигналов и равна $n=11$. При большом количестве одновременно принимаемых сигналов это дает заметную экономию времени на

получение решения по сравнению с оптимальным алгоритмом, где эта размерность равна $m+7$.

В разделе 2.4 представлены возможности дальнейшего упрощения алгоритма МФАП, использующие тот факт, что интервал корреляции ошибок существенно превышает интервал корреляции составляющих фазы, что позволяет отказаться от выполнения, на каждом шаге работы МФАП, достаточно трудоемкой операции расчета компонент корреляционной матрицы ошибок. Вместо этого предложено либо заранее рассчитывать элементы корреляционной матрицы ошибок под определенную динамику объекта как константы, либо рассматривать их, как медленно меняющуюся функцию времени, интервал корреляции которой на несколько порядков превосходит темп выдачи оценок параметров.

Приведены варианты алгоритма МФАП, в которых уравнения Риккати при различной динамике переменных решаются раздельно, что позволяет независимо рассчитывать элементы корреляционной матрицы ошибок для компонент вектора $\mathbf{x} = [x, y, z, \Delta]^T$. Такой подход позволяет дополнительно уменьшить трудоёмкость расчета и уменьшить размерность РФК.

В разделе 2.5 приводится оценка величины вклада в приращение полной фазы сигнала, составляющих фазы, обусловленных движением потребителя, динамикой его ОГ и шумами приемника. Приводятся зависимости спектральных плотностей компонент, определяющих динамику полной фазы сигнала для динамичного и стационарного потребителей, а также в зависимости от ширины полосы слежения ФАП. Отмечается, что при полосе слежения ФАП менее 1,5 Гц для динамичного потребителя ключевым воздействующим фактором становится его динамика.

В разделе 2.6 с использованием известного из литературы выражения анализируются вероятности правильного разрешения неоднозначности при использовании МФАП. Неоднозначность определения псевдодальности по фазе несущей является известной проблемой ГНСС, связанной с тем, что измеряемая псевдодальность значительно (на 8 и более десятичных порядков) превышает длину волны. Для устранения этого эффекта применяются различные алгоритмы раскрытия фазовой неоднозначности. Показано, что с ростом числа m эта вероятность правильного разрешения неоднозначности монотонно убывает со скоростью, которая тем ниже, чем выше точность измерений. При фиксированном m увеличение точности оценивания фаз сигналов НКА, достигаемое при использовании МФАП, повышает вероятность правильного разрешения неоднозначности, поэтому, с ростом числа сигналов m , эта вероятность убывает значительно медленнее, чем в случае автономных ФАП.

В разделе 2.7 рассматривается применение МФАП в системах, использующих разностные методы измерений.

В разделе 2.8 описан облик навигационной аппаратуры с применением МФАП. Приводится структурная схема НАП, построенной по принципу двухэтапной обработки, реализующая описанные преимущества МФАП при

разрешении неоднозначности фазовых измерений, при оценке задержкигибающей в СОС и др.

Третья глава посвящена анализу характеристик разработанных алгоритмов.

Строгие математические методы анализа сложных многомерных систем, к которым относится МФАП, в настоящее время отсутствуют, поэтому основным методом их исследования остается статистическое моделирование. В данной главе указанным методом исследуются следующие характеристики алгоритмов, предложенных и синтезированных в Главе 2:

— помехоустойчивость МФАП;

— точность оценивания фаз при различных реализациях алгоритма МФАП;

— особенности работы МФАП при совместной обработке сигналов, различающихся по мощности;

— шумовая полоса МФАП.

В разделе 3.1 приводится анализ одной из важнейших характеристик - помехоустойчивости ФАП.

Результаты имитационного моделирования показывают следующее:

— помехоустойчивость МФАП пропорциональна числу совместно обрабатываемых сигналов

— для динамичного потребителя выигрыш помехоустойчивости относительно автономной ФАП пропорционален $\sim M/4$;

— с уменьшением динамики потребителя выигрыш помехоустойчивости МФАП относительно автономной ФАП снижается и стремится к помехоустойчивости автономной ФАП и соответствует ей в случае стационарного потребителя;

— для стационарного потребителя помехоустойчивость определяется помехоустойчивостью индивидуальных ФАП;

— повысить ПУ МФАП в условиях малой динамики потребителя, а также для стационарного потребителя, можно применив в качестве индивидуальных ФАП систему ФАП второго порядка, которая показывает выигрыш помехоустойчивости 1-2 дБ относительно индивидуальной ФАП первого порядка.

В разделе 3.2 исследуется точность оценивания (СКО) фазы при различных способах вычисления корреляционной матрицы ошибок.

На Рисунке 3 представлены типичные зависимости СКО оценок фазы от числа совместно обрабатываемых сигналов для алгоритма МФАП при различных вариантах решений корреляционной матрицы ошибок R_λ , рассмотренных в Главе 2.

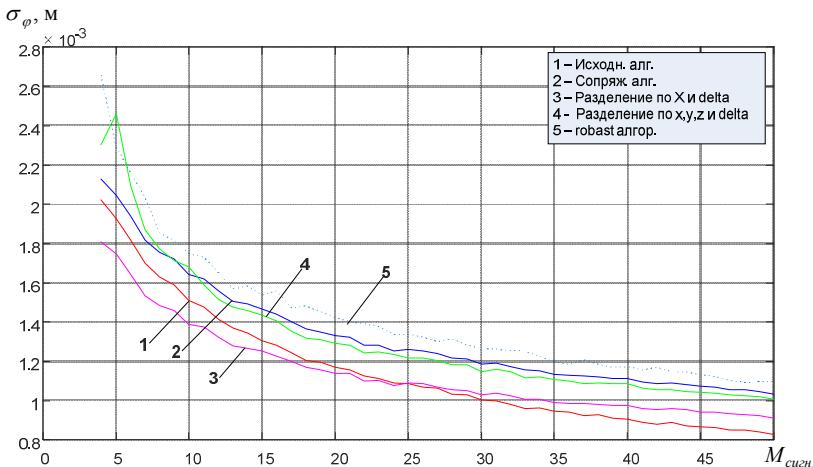


Рис. 3. Зависимости СКО оценки фазы от числа совместно обрабатываемых сигналов

раза. Максимальный (для робастного алгоритма) разброс кривых относительно оптимального алгоритма не превышает 0.4 м, т.е. рассмотренные упрощения не приводят к существенному возрастанию погрешности оценки фазы. Это различие проявляется тем сильнее, чем больше относительный «вес» общей составляющей погрешности.

В разделе 3.3 рассматриваются особенности работы МФАП при совместной обработке сигналов, различающихся по мощности.

Существенно, что в МФАП для оценки каждого сигнала, используют набор сильно коррелированных данных, поэтому уменьшение мощности какого-либо из сигналов вплоть до прекращения его приема («пропадания») не приводит к мгновенному срыву слежения за его фазой. Оценка описанного эффекта, названного в работе «взаимной поддержкой», неоднозначна: с одной стороны, он демпфирует последствия кратковременных случайных нарушений фильтрации сигналов, с другой при определенных условиях «слабый» сигнал может оказывать критическое влияние на величину ошибок оценивания других сигналов, вплоть до срыва слежения МФАП в целом. Проблема исключения таких негативных явлений рассматривается в Главе 4.

В разделе 3.4 исследуется шумовая полоса (ШП) МФАП.

В отличие от автономных ФАП, шумовая полоса которых зависит только от расчетной динамики потребителя, ШП МФАП определяется несколькими факторами:

- динамикой общей составляющей изменения фазы (динамика потребителя, динамика ОГ);
- динамикой индивидуальных случайных составляющих фаз сигналов;
- количеством совместно обрабатываемых сигналов.

Результаты расчета ШП МФАП, могут быть сформулированы следующим образом.

1. Нижняя граница полосы ШП МФАП определяется ШП автономной ФАП, которая, в свою очередь, определяется динамикой индивидуальных составляющих фазы.
2. Верхняя граница ШП МФАП определяется общей составляющей фазы.

Кривые соответствуют значению ОСШ (энергопотенциалу)

40 дБГц и дисперсии формирующих шумов, эквивалентных динамике потребителя 10 м/с.

Как следует из Рисунка 3 при десятикратном (с 5 до 50) увеличении числа совместно обрабатываемых сигналов СКО оценки фазы снижается примерно в 2

3. С ростом числа совместно обрабатываемых сигналов ШП МФАП сужается и стремится к величине, соответствующей индивидуальной ФАП.

В четвертой главе рассмотрены вопросы селекции «аномальных» сигналов при использовании МФАП

В разделе 4.1 обращается внимание на описанный выше (в разделе 3.2) эффект «групповой поддержки», который может обеспечить продолжение слежения МФАП за фазой «аномального» сигнала даже после его «пропадания». Однако этот процесс сопровождается снижением общей помехоустойчивости МФАП, (вплоть до возможного срыва слежения).

В работе решается задача обнаружения аномалий в виде уменьшения энергопотенциала сигнала и аномального доплеровского сдвига частоты. Очевидно, что в первом случае решающая статистика должно быть функцией оценки энергопотенциала, а во втором – функцией оценок составляющих фазы сигнала. Однако, поскольку величина энергопотенциала и дисперсия фазы однозначно связаны, оценка этой дисперсии, также может использоваться при построении правила обнаружения аномалий энергопотенциала.

В разделе 4.2 решается задача выбора и обоснования структуры *решающей статистики*, т.е. функции выборочных значений, используемой для проверки гипотезы об отсутствии «аномальных» значений параметров наблюдаемых сигналов.

Для упрощения анализа предложено за оценку энергопотенциала принять *отношение оценок* вида $\hat{q}_i = \hat{M}_i^2 / (2 \cdot h \cdot \hat{D}_i)$, где h - величина интервала усреднения, на котором вычисляются оценки.

В разделе 4.3 показано, что для обнаружения аномалии в виде доплеровского сдвига необходимо контролировать усредненные приращения индивидуальных составляющих фаз $\Delta\varphi_{0,i,t} = R_{0,i}u_{d,i}$ каждого i -го индивидуального канала МФАП. Они являются составляющими уравнения фильтрации для оценки фазы (5) и определяются только компонентой на выходе фазового дискриминатора:

$$M\{\Delta\varphi_{0,i}\} = \frac{1}{k} \sum_{j=t}^{T+1} \Delta\varphi_{0,i,j} = \frac{1}{k} \sum_{j=t}^{T+1} R_{0,i,j} \cdot u_{d,i,j}, \quad (8)$$

где $T = k \cdot h$ - интервал усреднения.

Разработана *структурная схема* устройства обнаружения «аномальных» сигналов.

В разделе 4.4 рассматривается задача выбора значения порога C , превышение которого соответствует решению об исключении сигнала из массива обрабатываемых. Точная величина порога C , обеспечивающего заданные вероятности ошибок $P_{л.m.}$ и $P_{обн.}$, зависит от параметров системы МФАП, динамики потребителя, соотношения уровней совместно обрабатываемых сигналов и ряда других факторов, что исключает возможность определить какое-либо единственное значение в качестве оптимального, и найти его аналитически. Поэтому в диссертации используется принцип *робастности*, согласно которому приемлемым считается значение порога,

обеспечивающего заданные вероятности ошибок $P_{\text{л.м.}}$ и $P_{\text{обн.}}$. Максимум выигрыша помехоустойчивости достигается при $P_{\text{л.м.}} = 1,4 \cdot 10^{-4}$ и $P_{\text{обн.}} = 0,7$.

В разделе 4.5 приводятся результаты имитационного моделирования непараметрического решающего правила (тест), рангово-знакового решающего правила Вилкоксона, для обнаружения аномального сигнала в МФАП,

$$S_{Vilk,i} = \sum_{k=1}^n R_k v(\Delta\varphi_{0,i,k}) > C, \quad (9)$$

где $v(\Delta\varphi_{0,i,k}) = \begin{cases} 1, & \Delta\varphi_{0,i,k} > 0, \\ 0, & \Delta\varphi_{0,i,k} < 0. \end{cases}$

Результаты моделирования показали, что выигрыш в помехоустойчивости для непараметрического теста при совместной обработке шести сигналов на 0,14 дБ ниже, чем для рассмотренного в разделе 4.3 параметрического теста. При совместной обработке 16 сигналов этот проигрыш возрастает до 0,6 дБ. Очевидно, что указанные потери представляют собой приемлемую плату за полную инвариантность вероятности ложной тревоги к вариациям помехи, достигаемую за счет применения описанного решающего правила.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы и соответствующие выводы

Основные результаты и выводы

Настоящая диссертационная работа посвящена вопросам повышения помехоустойчивости и точности навигационной аппаратуры потребителя ГНСС за счет использования алгоритмов совместной обработки совокупности сигналов на уровне первичной обработки.

Для решения поставленной цели в работе проведены: - анализ отечественных и зарубежных публикаций, который выявил класс алгоритмов, позволяющих повысить помехоустойчивость и точность оценок как РНП, так и НВО в целом; - синтез оптимального алгоритма многосигнальной системы ФАП применительно к двухэтапной схеме построения НАП; - синтез квазиоптимальных алгоритмов МФАП; - сравнительный анализ методом имитационного моделирования характеристик синтезированных алгоритмов между собой, а также относительно ранее известных и исследованных алгоритмов; - выбор и обоснование структуры и параметров правил обнаружения аномалий в сигналах и их исключении из массива сигналов, совместно обрабатываемых в МФАП; - экспериментальные исследования алгоритма МФАП его характеристик с использованием программного приемника НАП по реальным сигналам НКА; - разработка структурных схем устройств, позволяющих реализовать полученные алгоритмы МФАП в современной НАП, построенной по *двухэтапной* схеме.

Методом имитационного моделирования показано, что:

- помехоустойчивость МФАП пропорциональна числу совместно обрабатываемых сигналов;
- для динамичного потребителя выигрыш помехоустойчивости относительно автономной ФАП пропорционален $\sim M/4$;

— с уменьшением динамики потребителя выигрыш помехоустойчивости МФАП относительно автономной ФАП снижается и стремится к помехоустойчивости автономной ФАП и соответствует ей в случае стационарного потребителя;

— для стационарного потребителя помехоустойчивость определяется помехоустойчивостью индивидуальных ФАП;

— повысить ПУ МФАП в условиях малой динамики потребителя, а также для стационарного потребителя, можно применив в качестве индивидуальных ФАП систему ФАП второго порядка, которая показывает выигрыш помехоустойчивости 1-2 дБ относительно индивидуальной ФАП первого порядка;

— МФАП устойчиво работает даже при пропадании одного или нескольких сигналов на время до десятков секунд. При этом увеличивается дисперсия оценки по другим сигналам;

— точность оценивания фаз сигналов с помощью алгоритмов МФАП пропорциональна числу совместно обрабатываемым сигналам. При типовых значениях ОСШ 40 дБГц точность оценок фаз с помощью МФАП в 3-4 раза выше точности оценивания с помощью автономной ФАП третьего порядка и соответствует уровню единиц миллиметров;

— применение упрощенных методов расчета корреляционной матрицы ошибок в алгоритмах МФАП, практически не приводит к снижению точности оценивания;

— отличие в точности оценивания фаз сигналов с использованием квазиоптимальных вариантов алгоритма МФАП, в том числе и робастного, относительно оптимального алгоритма МФАП, составляет не более 1%;

— для сохранения характеристик МФАП, близких к оптимальным, необходимо своевременно выявлять и исключать из массива совместно обрабатываемых сигналов аномальные сигналы.

В приложениях приведены акты внедрения.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Кушнир А.А., Шувалов А.В. Обзор методов повышения помехоустойчивости приемной аппаратуры СРНС. // Труды V молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии», Москва, 2007, С. 33-35.(2,7 п.л. / 1,2 п.л.).

2. Кушнир А.А., Шувалов А.В. Оптимальный алгоритм совместного сопровождения спутниковых сигналов в навигационной аппаратуре GPS/ГЛОНАСС // Радиотехника. Радиосистемы (Журнал в журнале). 2007. № 7. С. 80-85. (5 п.л. / 2,5 п.л.).

3. Кушнир А.А., Шувалов А.В. Оптимальный алгоритм совместного сопровождения спутниковых сигналов в навигационной аппаратуре GPS/ГЛОНАСС // Выпуск 1. Спутниковые радионавигационные системы. Коллективная монография под ред. М.С. Ярлыкова. – М.: Радиотехника, 2013. – С. 87-93. (5 п.л. / 2,5 п.л.).

4. Харисов В.Н., Кушнир А.А. Многосигнальная система ФАП для повышения помехоустойчивости приемников СРНС // Радиотехника. Радиосистемы (Журнал в журнале), 2013, № 7, С.102-108. (6 п.л. / 3 п.л.).
5. Харисов В.Н., Кушнир А.А. Многосигнальная система ФАП для повышения помехоустойчивости приемников СРНС // Радиотехника. Серия «Радиосвязь и радионавигация», выпуск 3. Радионавигационная технология, (Журнал в журнале), 2013, С.13-20. (6,2 п.л. / 3 п.л.).
6. Кушнир А.А. Многосигнальная система фазовой автоподстройки для системы синхронизации по сигналам ГНСС. // Радиооптические технологии в приборостроении: Тезисы докладов IX научно-технической конференции, п. Небуг, Краснодарский край, 2013, С. 45. (1 п.л. / 1 п.л.).
7. Исследование методов и алгоритмов обработки перспективных навигационных сигналов ГЛОНАСС в навигационной аппаратуре специальных потребителей: отчет о СЧ НИР «Свертка-В» Этап 2 / Ефименко В.С. – Москва: ФГБОУ ВО, 2013.
8. Проведение имитационного моделирования алгоритмов обработки перспективных сигналов глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС и измерений: отчет о СЧ НИР «Свертка-В» Этап 3 / Ефименко В.С. – Москва: ФГБОУ ВО, 2014.
9. Экспериментальные исследования алгоритмов обработки перспективных сигналов глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС и измерений. Разработка предложений по их использованию в аппаратуре специальных потребителей: отчет о СЧ НИР «Свертка-В» Этап 4 / Ефименко В.С. – Москва: ФГБОУ ВО, 2015.
10. Исследование направлений развития перспективной навигационной аппаратуры специальных потребителей: отчет о СЧ НИР «Развитие-МО-ВНИИР», Этап 1 / Ефименко В.С. – Москва: ФГБУ РАРАН, 2015.
11. Анализ эффективности применения узконаправленного луча антенны бортового источника навигационного сигнала для повышения помехозащищенности навигации. Анализ возможности использования данных НАП массового применения для создания международной системы обнаружения и минимизации помех в частотном диапазоне работы спутниковых навигационных систем: отчет о СЧ НИР «Развитие-ВНИИР-Э4» Этап 1 / Ефименко В.С. –г. Королев: ФГУП "ЦНИИМаш", 2015.
12. Методы приема, обработки и оценки сигналов межспутниковой радиолинии системы ГЛОНАСС: отчет о СЧ ОКР «ГЛОНАСС-КК-Н-МРЛ-А-МГТУ» Этап 1 / Власов И.Б. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017 г.
13. Исследование методов обработки сигналов различных ГНСС, обеспечивающих повышение стабильности навигации потребителей в сложных условиях: отчет о СЧ НИР «Вызов-Перспектива-23» / Кушнир А.А. - Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.
14. Карутин С.Н., Харисов В. Н., Пельтин А. В., Кушнир А. А. Синтез и анализ характеристик алгоритма многочастотной системы фазовой автоподстройки частоты в приемниках ГНСС // Новости навигации. 2020. №3. С.8-13. (5 п.л. / 1,25 п.л.).