

На правах рукописи



Кремез Николай Сергеевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В БОРТОВОЙ
РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СИГНАЛОВ МЕЖСПУТНИКОВОЙ РАДИОЛИНИИ ГЛОНАСС

05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель – доктор технических наук Гречкосеев Александр Кузьмич.

Официальные оппоненты:

- Толстикова Александра Сергеевна – доктор технических наук, Федеральное государственное унитарное предприятие «Сибирский государственный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии», отдел «Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли», начальник отдела.

- Карцан Игорь Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», научно-исследовательское управление, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

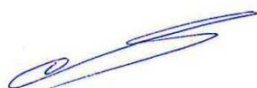
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск

Защита состоится « 19 » декабря 2017 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д212.099.21 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 13а, ауд. 1-07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Дмитриев Дмитрий Дмитриевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время космические системы стали неотъемлемой частью человеческой деятельности, группировка космических аппаратов (КА) представлена во всем спектре различных типов орбит искусственных спутников Земли.

К одной из сложных задач по управлению КА относится задача определения его движения по результатам измерений. Под движением КА понимается : движение его центра масс и движение КА вокруг центра масс. Задача определения параметров движения центра масс (параметров движения) КА по измерениям решается в наземных комплексах управления космическими системами, в бортовых радионавигационных и оптических устройствах.

Задача определения параметров движения вокруг центра масс КА (параметров ориентации) в основном решается на борту КА на основе измерений оптикоэлектронных устройств и инерциальных систем ориентации. Общеизвестные алгоритмы определения и прогнозирования параметров движения КА по траекторным измерениям в наземном комплексе управления (НКУ) обеспечивают необходимую надежность и точность для решения задач управления КА. Фактором, существенно ограничивающим точность навигационного обеспечения КА на геостационарной орбите (ГСО), является недостаточное развитие сети командно-измерительных средств НКУ.

Эффективными методами увеличения срока автономного функционирования, снижения нагрузки на НКУ и увеличения точности определения параметров движения КА на ГСО являются методы, основанные на применении в составе бортовой аппаратуры многоканальных приемников глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Прямой перенос методов, разработанных для наземных потребителей, невозможен для применения в бортовой радионавигационной системе КА на ГСО, поскольку орбита КА выше непрерывного навигационного поля ГНСС. Основная проблема применения ГНСС-приемников на ГСО заключается в разрывном навигационном поле, и как следствие, в малом количестве одновременно наблюдаемых навигационных КА (НКА), в низком энергетическом потенциале радиолинии НКА – КА, обусловленным большим расстоянием между ними.

Поиск методов высокоточной навигации и определения пространственной ориентации КА на ГСО по сигналам НКА ГЛОНАСС/GPS в составе бортовой аппаратуры многоканальных ГНСС-приемников определил направление диссертационной работы.

Степень разработанности темы исследования. В отечественной и зарубежной практике построения бортового оборудования КА широкое применение находят автономные системы навигации (АСН), использующие сигналы ГНСС ГЛОНАСС, GPS, Галилео и др. При этом преимущество имеют системы, позволяющие осуществлять прием сигналов нескольких ГНСС для повышения надежности их функционирования. Основополагающие результаты в области определения и прогнозирования параметров движения КА по результатам измерений изложены в работах Эльясберга П.Е., Бажинова И.К., Почукаева В.Н., Шебшаевича В.С., Жданюка Б.Ф. и др. и развиты в работах Цепелева А.В., Неволько М.П., Бартенева В.А., Толстикова А.С., Забокрицкого А.В., Пасынкова В.В., Гречкосеева А.К. и др.

Для определения не только параметров движения центра масс КА, но и параметров его ориентации – движения вокруг центра масс – в работах Козореза Д.А., Красильщикова М.Н., Бартенева В.А., Гречкосеева А.К. в состав АСН предлагается включать, кроме многоканальных ГНСС-приемников, оптико-электронные датчики Земли, Солнца и звезд, а также инерциальную систему ориентации на электростатических и волоконно-оптических гироскопах. Немалое значение в этих работах отводится исследованию алгоритмических методов определения местоположения КА на ГСО по измерениям сигналов глобальных навигационных спутниковых систем.

В работах Байрамова К.Р., Бетанова В.В., Ступака Г.Г. , Фатеева Ю.Л. подробно излагаются различные методы определения ориентации наземных потребителей по псевдофазовым измерениям в ГНСС с рассмотрением структур измерителя и разрешения неоднозначности псевдофазовых измерений, в том числе интерферометрическими методами, основополагающие принципы которых легли в основу разработанного в работе пеленгационного метода.

Однако в известных работах не рассмотрены такие вопросы как:

- определение пространственной ориентации КА на ГСО по навигационным сигналам ГНСС совместно с сигналами межспутниковой радиолинии (МРЛ) в бортовом ГНСС-приемнике;
- определение движения центра масс КА на ГСО (высокоточная навигация) по сигналам МРЛ в бортовом ГНСС-приемнике;

Существующие методы определения координат и пространственной ориентации, применяемые в наземных приемниках, не подходят для приме-

нения на геостационарных КА. Методы определения координат в бортовых приемниках основываются только на навигационных сигналах ГНСС, имеют погрешности определения координат сотни метров, в связи с чем и требуется разработка новых методов определения движения для КА на ГСО, ориентированных на характеристики КА ГЛОНАСС нового поколения, имеющих дополнительно сигналы МРЛ. Таким образом, существует актуальная задача повышения точности определения параметров движения и параметров ориентации КА на ГСО в бортовой радионавигационной системе с ГНСС-приемником, из которой следует **научная задача**, решаемая в диссертации, – разработка и исследование новых методов определения движения КА на ГСО в бортовых ГНСС-приемниках с использованием МРЛ ГЛОНАСС.

Целью диссертационной работы является повышение точности определения движения геостационарных КА на основе применения в бортовой радионавигационной системе методов высокоточной навигации и измерения пространственной ориентации с использованием навигационных сигналов и сигналов МРЛ ГЛОНАСС.

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

- исследованы направления развития методов и средств высокоточной навигации в бортовой радионавигационной системе геостационарных КА в целях повышения ее точности;

- разработаны методы высокоточной навигации и измерения пространственной ориентации КА на ГСО в бортовых многоканальных ГНСС-приемниках с использованием сигналов межспутниковой радиолинии ГЛОНАСС;

- разработаны компьютерные модели, позволяющие обеспечить проведение экспериментальных исследований разработанных методов и алгоритмов высокоточной навигации КА на ГСО.

- создан программно-аппаратный комплекс для исследования методов высокоточной навигации КА на основе разработанных компьютерных моделей и аппаратной части с использованием макета многоканального ГНСС-приемника, имитатора сигналов ГЛОНАСС/GPS и измерительной аппаратуры.

- проведены экспериментальные исследования разработанных методов и алгоритмов на основе математического моделирования с привлечением реальных измерений макетов аппаратуры.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Впервые теоретически обоснована и экспериментально подтверждена математическим моделированием целесообразность использования сигналов

МРЛ для навигационных определений КА на ГСО и разработан метод высокоточного определения параметров движения на этой основе.

2. Разработан новый метод измерения углов пространственной ориентации, позволяющий повысить помехоустойчивость и точность измерения радионавигационных параметров за счет применения в качестве антенной системы антенных решеток (АР).

3. Впервые разработан алгоритм разрешения фазовой неоднозначности, основанный на пеленгационном методе, обеспечивающий надежное разрешение фазовой неоднозначности и повышение точности измерения пространственной ориентации связанного с антенной системой объекта за счет большой избыточности измерений, что позволяет использовать переборные методы даже при достаточно длинных базах по причине небольшого числа вариантов перебора.

Теоретическая значимость исследования заключается в дальнейшем развитии методов радионавигации на основе применения новых сигналов и расширении границ их применения.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что применение разработанных методов позволит создавать КА на ГСО, обладающие повышенными потребительскими свойствами и сроком автономного функционирования.

Полученные результаты внедрены на АО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь», а также в учебный процесс Учебного военного центра Сибирского федерального университета.

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении прикладного научного исследования «Разработка архитектуры СБИС класса «Система на кристалле» для создания угломерного навигационного приемника» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (Соглашение о предоставлении субсидии от 27 октября 2015 г. № 14.578.21.0116, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57815X0116).

Объектом исследований является бортовая навигационная система (БНС) геостационарных космических аппаратов, **предметом исследования** – методы высокоточной навигации и измерения пространственной ориентации КА на ГСО, основанные на использовании в составе бортовой аппаратуры КА многоканальных ГНСС-приемников.

Методы исследований. При решении поставленной научной задачи использовались методы математического анализа, линейной алгебры, теории вероятностей, теории математической статистики и автоматического управления, численные методы решения уравнений, методы численного моделирования исследуемых процессов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод высокоточных определений параметров движения и угловой ориентации осей геостационарных КА по сигналам бортовой аппаратуры межспутниковых измерений навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС/GPS, позволяющий проводить навигационные измерения как минимум в 75,3 % времени наблюдения.

2. Пеленгационный метод измерения углов пространственной ориентации в навигационной аппаратуре ГЛОНАСС/GPS, эффективно использующий преимущества антенной решетки, позволяющий использовать переборные методы при разрешении фазовой неоднозначности по сигналам даже одного НКА.

3. Программно-аппаратный комплекс моделирования процессов обработки навигационных сигналов ГНСС в бортовой навигационной системе на базе разработанных компьютерных моделей, позволяющий исследовать методы и алгоритмы высокоточной навигации КА на ГСО.

Степень достоверности результатов проведенных исследований обеспечена применением апробированного математического аппарата, применением стандартных математических пакетов обработки данных, учётом основных факторов, корректными допущениями и подтверждается сходимостью полученных автором в процессе математического моделирования результатов с результатами экспериментальных работ.

Апробация результатов. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались: на XII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC-2006), г. Воронеж (2006 г.); на IV Всероссийской конференции с международным участием «Современные проблемы развития науки, техники и образования», г. Красноярск (2007 г.); на XI Международной IEEE Сибирской конференции по управлению и связи (International Siberian Conference on Control and Communications) SIBCON-2015, г. Омск (2015 г.); на XX Юбилейной международной научно-практической конференции «Решетневские чтения» (2016 г.).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 19 работ, из них: 9 – статьи в изданиях по списку ВАК, а также входящие в базы данных Scopus и Web of Science; 4 – работы, опубликованные в материалах всероссийских и международных конференций; 2 – патенты на изобретение; 4 – свидетельства на регистрацию программы ЭВМ. Все результаты диссертации, выносимые на защиту, получены автором лично или при его непосредственном участии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы. Общий объем работы составляет 151 страницу, из них 137 страниц основного текста, включая 64 рисунка, 23 таблицы, список литературы из 110 наименований на 12 страницах, в том числе 19 работ автора.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование актуальности темы исследований, сформулирована цель работы, изложены научная новизна работы, научная и практическая значимость проведенных исследований, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе изложена оценка научно-технического уровня в области разработки методов высокоточной навигации и измерения пространственной ориентации КА за счет использования в составе бортовой аппаратуры многоканальных ГНСС-приемников; обоснован выбор направления исследований и дана оценка их эффективности; поставлена задача на дальнейшее исследование.

На геостационарных КА измерение координат и пространственной ориентации при помощи ГНСС-приемников осуществляется в единичных случаях на отдельных КА. Часто ГНСС-приемники в этом случае играют вспомогательную роль, основная нагрузка по навигационному обеспечению ложится на автономные навигационные системы (инерциальные или с использованием звездных датчиков), а также на наземный комплекс управления.

Основными направлениями повышения автономности функционирования геостационарных КА, основанными на использовании высокоточных навигационных измерений, являются:

- использование интегрированных навигационных систем на основе ГНСС-приемников и автономных навигационных систем (инерциальных, звездных датчиков и т. п);

- автономное применение многоканальных ГНСС-приемников, при этом непрерывность и высокая точность измерений получается, как правило, за счет использования алгоритмических методов, основанных на знании моделей движения КА на ГСО и НКА;

- оснащение многоканальных ГНСС-приемников каналом для приема сигналов МРЛ как НКА ГЛОНАСС, так и НКА GPS; разработка методов обработки межспутниковых измерений по каналу МРЛ.

В главе определен объект и поставлена цель исследования – повышение точности определения движения геостационарных КА на основе применения в бортовой радионавигационной системе методов высокоточной навигации и измерения пространственной ориентации с использованием навигационных сигналов и сигналов МРЛ ГЛОНАСС.

Определен предмет исследования и сформулирована научная задача – разработка и исследование новых методов определения движения КА на ГСО в бортовых ГНСС-приемниках с использованием МРЛ ГЛОНАСС.

Во второй главе предложен метод высокоточной навигации и измерения пространственной ориентации КА на ГСО, основанный на использовании в составе бортовой аппаратуры КА многоканальных ГНСС-приемников.

Орбиты КА на ГСО находятся значительно выше орбит НКА ГЛОНАСС и GPS, в связи с чем потребитель и НКА находятся по разные стороны Земли. Сигналы НКА образуют непрерывное навигационное поле, как на поверхности Земли, так и на высотах до 2000–3000 км, при этом часть сигналов не экранируется поверхностью земли и образует за ней разрывное навигационное поле, имеющее структуру пересекающихся кольцевых полос. Ширина данных полос определяет количество и продолжительность сеансов радионавигации.

Прием навигационных сигналов НКА на ГСО возможен только в узком диапазоне углов $\varepsilon = 8,4^\circ \dots 11,3^\circ$, НКА GPS – $\varepsilon = 8,4^\circ \dots 13,2^\circ$. Диаграмма направленности (ДН) антенны МРЛ (рисунок 1) НКА ГЛОНАСС, в отличие от навигационного канала (рисунок 2), конусообразная с провалом, направлен-

ным на центр Земли, что обеспечивает одинаковую мощность сигналов, принимаемых от всех видимых спутников.

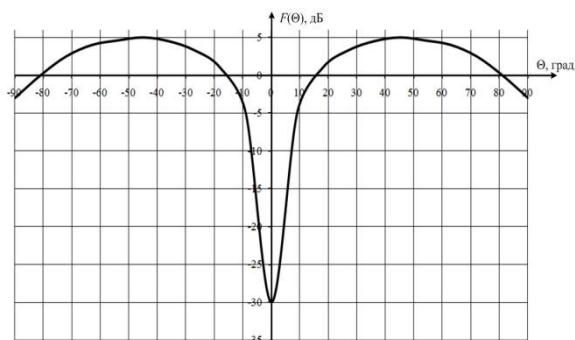


Рисунок 1 – Примерный вид ДН $F(\Theta)$ антенны МРЛ НКА ГЛОНАСС

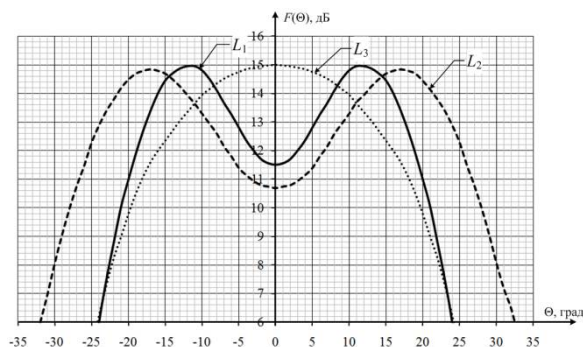


Рисунок 2 – Примерный вид ДН $F(\Theta)$ бортовой антенны НКА «Глонасс-К»

На рисунках 3 и 4 представлена зависимость коэффициента усиления антенны МРЛ НКА в направлении КА на ГСО от угла ε . Расчет энергетических характеристик радиолинии «НКА – КА на ГСО» с учетом ДН приемной и передающей антенн показал, что по каналу навигационных сигналов мощность навигационных сигналов достаточна в диапазоне углов $\varepsilon = 8,6 \dots 13^\circ$ для НКА «Глонасс-М» и $\varepsilon = 8,6 \dots 15^\circ$ (20° для частоты $L2$) для НКА «Глонасс-К». По каналу МРЛ требуемая мощность сигналов обеспечивается в диапазоне углов $\varepsilon = 17 \dots 37^\circ$.

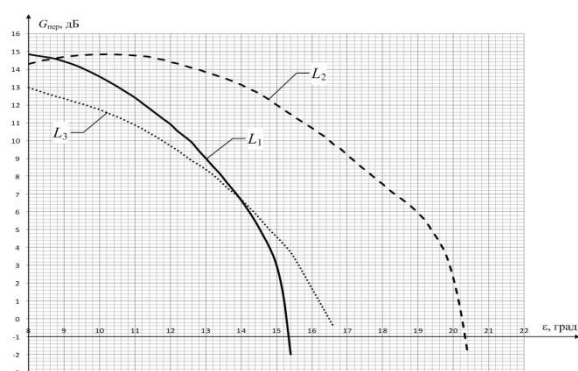


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента усиления бортовой антенны НКА «Глонасс-К» в направлении КА на ГСО от угла ε

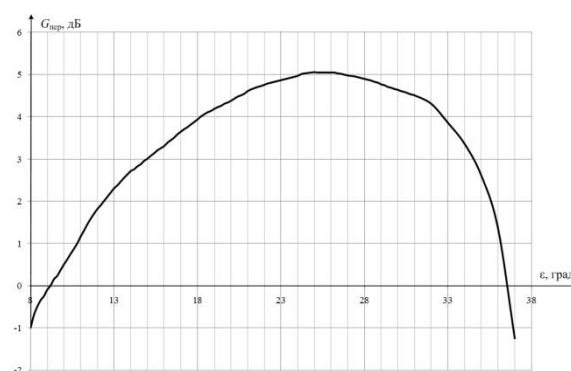


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента усиления антенны МРЛ НКА в направлении КА на ГСО от угла ε

Расчеты были проведены в предположении, что приемная антенна обладает коэффициентом усиления 3 дБ. Однако, в отличие от наземных навигационных приемников, с геостационарной орбиты НКА наблюдается только в конусе с максимальным углом при вершине $2\varepsilon = 37^\circ$. Использование приемной

антенны с шириной ДН $2\Theta_{0,5P} = 37^\circ$ (коэффициент усиления 10 дБ) позволит увеличить мощность принимаемых навигационных сигналов и сигналов МРЛ на 7 дБ. Итоговые результаты расчетов мощности принимаемых навигационных сигналов и сигналов МРЛ на выходе антенны с коэффициентом усиления 10 дБ на геостационарной орбите приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Мощность принимаемых навигационных сигналов и сигналов МРЛ

Тип НКА	Частотный диапазон	Диапазон углов ε , град	Диапазон мощности принимаемого сигнала, дБВт
«Глонасс-М»	L1	8,6...13°	-163...-150
	L2	8,6...13,5°	-163...-152
«Глонасс-К»	L1	8,6...15°	-163...-149
	L2	8,6...20°	-163...-151
	L3	8,6...16°	-163...-152
«Глонасс-М» «Глонасс-К»	МРЛ	17...37°	-163...-160

Оценки погрешностей измерения псевдодальности радионавигационных сигналов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Погрешности измерения псевдодальности радионавигационных сигналов

Сигнал		Погрешность измерения
L_1 , частотное разделение	СТ	0,042 м
	ВТ	0,013 м
	Фазовая псевдодальность*	0,340 мм
L_2 , частотное разделение	СТ	0,086 м
	ВТ	0,027 м
	Фазовая псевдодальность*	0,890 мм
L_1, L_2 , кодовое разделение		0,022 м
L_3		0,010 м

* при измерительном интервале 0,2 с

Таким образом, остается один путь повышения точности – это повышение энергетического потенциала радиолинии. В существующей аппаратуре повышение энергетического потенциала достигается за счет применения узконаправленной параболической антенны с большим усилением. Кроме того, возможно применение малоэлементной АР. При использовании антенной решетки с формированием луча на каждый наблюдаемый НКА энергетический потенциал Q увеличивается в m раз, где m – число элементов АР. Потери при формировании ДН составляют 1...2 %, поэтому их можно не учитывать.

Основная проблема приема сигнала МРЛ – это временное разделение сигналов НКА, при этом перерыв при приеме сигнала составляет 15 с. За это

время может значительно уйти опорный генератор приемника и могут возникнуть проблемы с измерением псевдодальности по фазе несущей частоты. Проблема решается при использовании в приемнике высокостабильного опорного генератора (желательно квантового стандарта частоты). При слежении за навигационными сигналами можно достаточно точно определить задержку сигнала МРЛ и непосредственно начинать слежение за сигналом сразу в момент его появления в заданном временном интервале. При этом решается проблема повторной синхронизации после перерыва.

Обработка сигналов МРЛ отличается от обработки навигационных сигналов тем, что используется другая псевдослучайная последовательность (ПСП); различная длительность измерительного интервала; различный формат обработки – сигналы МРЛ обрабатываются только в соответствующем временном интервале. При совместной фильтрации в контуре оценки параметров навигационного сигнала и сигнала МРЛ используется информация о задержке навигационных сигналов по кодовым и фазовым измерениям на интервале дискретизации измерительной системы, полученная в контурах слежения за кодом и фазой несущей частоты (приращения фазовой псевдодальности – ПД). Такой подход основан на том, что на относительно малых интервалах времени (единицы...десятки секунд) приращение кодовой и фазовой псевдодальностей навигационного сигнала, обусловленное взаимным перемещением НКА и приемной антенны, с точностью до шумовой погрешности совпадает с приращением кодовой и фазовой псевдодальности сигнала МРЛ. Структурная схема измерителя с совместной обработкой навигационного сигнала и сигнала МРЛ представлена на рисунке 5.

Поскольку слежение за фазой навигационного сигнала осуществляется непрерывно с высокой точностью (единицы миллиметров), то все приращения ПД (как навигационного сигнала, так и сигнала МРЛ), обусловленные взаимным перемещением НКА и приемной антенны ГНСС-приемника, с успехом отслеживаются фильтром схемы слежения за несущей (ССН). При перерывах приема сигналов МРЛ слежение за сигналом в фильтре производится по приращениям псевдодальности, поступающими из ССН навигационного сигнала. Совместная обработка навигационных сигналов и сигналов МРЛ позволяет получить приемлемые точности навигационных определений, несмотря на временное разделение сигналов НКА. Однако данный недостаток перекрывается более широкой ДН, обеспечивающей более длительный период наблюдаемости сигнала НКА на ГСО. Временное разделение сигналов МРЛ возможно компенсировать за счет совместной обработки навигацион-

ных сигналов и сигналов МРЛ. При совместных измерениях шумовая погрешность при измерениях на одиночную антенну составляет 0,23...0,68 м.

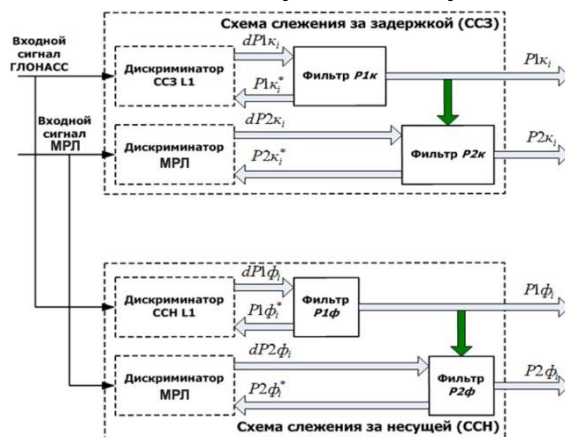


Рисунок 5 – Структурная схема измерителя с совместной обработкой навигационного сигнала и сигнала МРЛ

Третья глава посвящена решению поставленной задачи разработки метода ускоренного разрешения фазовой неоднозначности, возникающей в многоканальных ГНСС-приемниках при реализации интерферометрических способов измерения пространственной ориентации.

Задача нахождения направляющих косинусов на источники излучения сигналов – это задача радиопеленгации. В данном случае отличием от обычной радиопеленгационной задачи является то, что конфигурация источников излучения точно известна. В основу угловых измерений положен интерферометрический метод. Антенная система представляет собой однобазовый или многобазовый интерферометр. Одним из перспективных направлений развития ГНСС-приемников является применение в качестве антенной системы АР.

Рассмотрим алгоритм разрешения фазовой неоднозначности в АР на примере 8-элементной АР, антенные элементы которой расположены равномерно на окружности радиусом 1 м (рисунок 6).

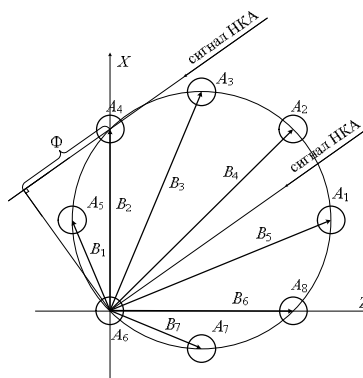


Рисунок 6 – Конфигурация баз между антеннами

Для определения ориентации объекта необходимо измерить положение векторов-баз в системе координат, связанной с Землей, для чего используются результаты измерения фазового сдвига сигналов НКА между разнесенными антеннами по двум базам. Также требуется получить решение задачи, если длины баз и угол между ними априорно неизвестны, например, при калибровке антенной системы радионавигационной аппаратуры. В зависимости от количества баз используемого интерферометра исходная система уравнений включает $N_6 \times N$ линейных уравнений, где N_6 – число баз интерферометра; N – число наблюдаемых НКА. В системе координат, связанной с объектом, известными считаются координаты векторов-баз, а неизвестными – направляющие косинусы направлений на НКА. Полученную систему уравнений можно дополнить N уравнениями связи между направляющими косинусами направлений на НКА и $N(N - 1)/2$ уравнениями связи между направлениями на различные НКА:

$$\begin{cases} k_{xi}x_j + k_{yi}y_j + k_{zi}z_j, \\ \sqrt{k_{xi}^2 + k_{yi}^2 + k_{zi}^2} = 1, \\ k_{xm}k_{xn} + k_{ym}k_{yn} + k_{zm}k_{zn} = \cos \gamma_{mn}. \end{cases} \quad (1)$$

При использовании m -антенного интерферометра одна из антенн используется в качестве опорной антенны и вместе с остальными антеннами образует $m - 1$ векторов-баз. Система уравнений (1) идентична системе уравнений для многобазового интерферометра. Роль неизвестных координат векторов-баз в системе (1) играют неизвестные координаты векторов-направлений на НКА, а роль коэффициентов – известные координаты векторов-баз. Таким образом, данная система уравнений симметрична относительно групп параметров, одна из которых координаты векторов-баз, а другая – направляющие косинусы направлений на НКА. При использовании пеленгационного алгоритма неизвестными являются направляющие косинусы вектора-направления на НКА. Для их определения нужно три уравнения. С учетом уравнения связи между компонентами неизвестного вектора для составления начального набора решений требуется две базы. Минимальная система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} k_x x_1 + k_y y_1 + k_z z_1 = \Phi_1, \\ k_x x_2 + k_y y_2 + k_z z_2 = \Phi_2, \\ \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Связанную систему уравнений выберем такой, чтобы обе базы лежали в горизонтальной плоскости объекта, т. е. $y_1 = 0$, $y_2 = 0$. Тогда система уравнений примет следующий вид:

$$\begin{cases} k_x x_1 + k_z z_1 = \Phi_1, \\ k_x x_2 + k_z z_2 = \Phi_2 \\ \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} = 1. \end{cases} \quad (3)$$

Линейная часть системы уравнений (3) описывает проекцию вектора-направления на НКА в горизонтальной плоскости объекта, нелинейное уравнение может быть использовано для определения вертикальной составляющей. При этом, учитывая, что сигналы НКА могут приниматься только из верхней полусферы (относительно плоскости АР), значения k_y должны принимать только положительные значения. Применительно к линейной части системы уравнений (3) геометрическое место точек возможных положений вектора-направления на НКА лежит внутри круга единичного радиуса. Если искомый вектор лежит в горизонтальной плоскости, то он находится на границе этой области.

Проведенное моделирование предложенного алгоритма, подробно описанное в диссертации, подтверждает, что разработанный пеленгационный метод измерения углов пространственной ориентации позволяет эффективно использовать преимущества АР. Алгоритм разрешения фазовой неоднозначности, основанный на пеленгационном методе, эффективно использующий преимущества антенной решетки, позволяет использовать переборные методы при разрешении фазовой неоднозначности по сигналам даже одного НКА.

В четвертой главе изложено решение задачи проведения экспериментальных исследований предлагаемых перспективных методов и средств высокоточной навигации, с использованием созданного программно-аппаратного комплекса, на базе созданных компьютерных моделей.

Структурная схема программно-аппаратного комплекса моделирования процессов позиционирования и измерения пространственной ориентации КА на ГСО представлена на рисунке 7.

При помощи имитатора сигналов ГЛОНАСС и GPS формируются сигналы НКА, которые подаются на излучающую антенну или непосредственно на вход макета многоканального ГНСС-приемника. Макет многоканального

ГНСС-приемника осуществляет прием и обработку навигационных сигналов в соответствии с разработанными методами высокоточной навигации и измерения пространственной ориентации КА на ГСО. При помощи персонального компьютера производится управление имитатором радионавигационных сигналов и макетом ГНСС-приемника с использованием разработанных компьютерных моделей движения и видимости КА на ГСО. Контроль за мощностью принимаемых навигационных сигналов производится при помощи анализатора спектра.

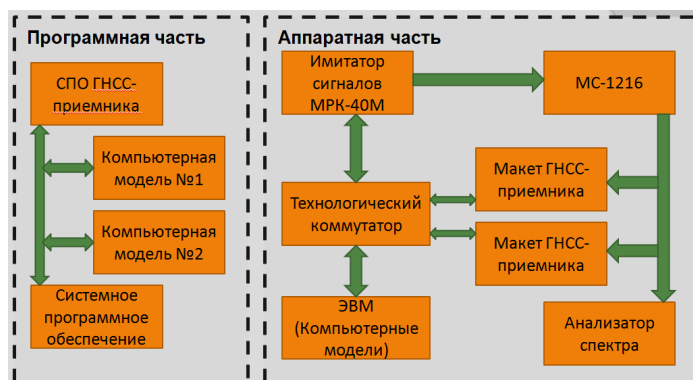


Рисунок 7 – Структурная схема программно-аппаратного комплекса

Оценка количества одновременно наблюдаемых НКА из точек стояния КА на ГСО была проведена для геостационарного спутника с параметрами геостационарного спутника «Ямал-401» с точкой стояния 90° в. д. и высотой орбиты равной 42 164 км. относительно центра масс Земли. Чувствительность ГНСС-приемника на борту КА на ГСО принималась равной минус 165 дБВт, коэффициент усиления приемной антенны – 3 дБ. Расчет количества одновременно наблюдаемых НКА выполнялся с помощью программы «Компьютерная модель навигационного поля в заданной точке орбиты космических аппаратов на геостационарных орбитах». Графики, отображающие общую видимость НКА для КА на ГСО, представлены на рисунке 8.

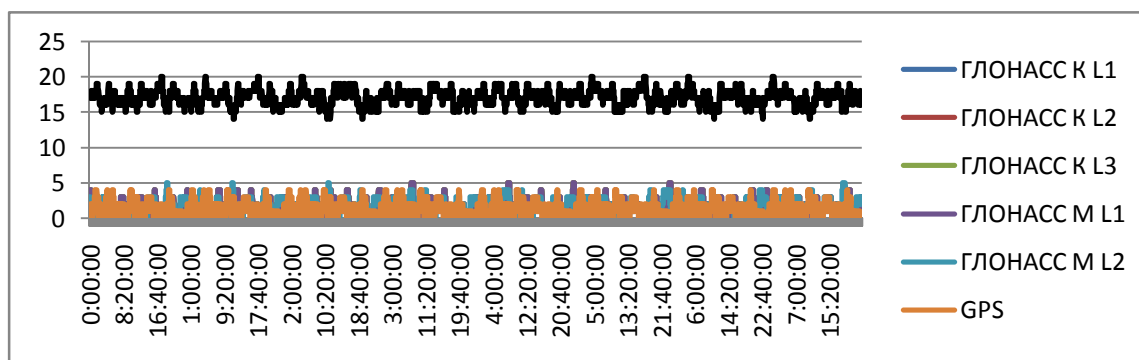


Рисунок 8 – Количество одновременно наблюдаемых НКА для КА на ГСО

Наиболее предпочтительным методом определения координат и пространственной ориентации КА будет являться метод с использованием сигналов МРЛ. При невозможности использования этих сигналов необходимо производить измерения при разрывном навигационном поле с использованием периодов видимости достаточного количества НКА. Расчет возможных точностных характеристик многоканальных ГНСС-приемников для КА на ГСО выполнялся для КА на ГСО, координаты которого были получены пересчетом координат точки стояния навигационной аппаратуры потребителя (НАП) до параметров КА на ГСО, путем подъема на высоту орбиты КА на ГСО точки стояния НАП с противоположной стороны Земли. Для решения навигационной задачи использовалось созвездие НКА, полученное по данным компьютерной модели навигационного поля в заданной точке орбиты КА на ГСО. Сигналы с ненаблюдаемых НКА НАП моделировались с использованием имитатора сигналов НКА ГЛОНАСС/GPS, входящего в состав программно-аппаратного комплекса моделирования процессов позиционирования и измерения пространственной ориентации КА на ГСО.

Для расшифровки кадров навигационной информации с учетом характеристик КА на ГСО использовалась программа «Компьютерная модель бортовой навигационной системы КА, основанной на использовании многоканальных ГНСС-приемников, обеспечивающей реализацию разработанных методов высокоточной навигации и измерения пространственной ориентации КА ГСО».

Погрешности определения параметров движения КА на ГСО по результатам моделирования приведены в таблице 3.

Таблица 3 – СКО погрешностей определения параметров движения КА на ГСО

	σ_x , м	σ_y , м	σ_z , м	σ_{V_x} , м/с	σ_{V_y} , м/с	σ_{V_z} , м/с	σ_α , угл. мин	σ_β , угл. мин	σ_γ , угл. мин
НКА ГЛОНАСС, тип спутника ГЛОНАСС-К, частота L1	1,68	1,84	1,93	0,02	0,02	0,01	6,08	6,29	5,48
НКА ГЛОНАСС, тип спутника ГЛОНАСС-К, частота L2	1,97	1,98	1,76	0,02	0,02	0,02	6,89	6,62	5,81
НКА GPS	1,75	1,92	1,93	0,01	0,02	0,01	4,53	4,06	7,26

Важным условием достижения высокой точности навигационных определений в спутниковой радионавигационной системе (СРНС) является такое взаимное пространственное расположение НКА в видимом созвездии потребителем, при котором обеспечивается требуемая точность навигационных определений при заданном уровне погрешностей измерения псевдодальностей. На этапе вторичной обработки оценки псевдодальностей и псевдоскоростей пересчитываются в оценки координат потребителя, поэтому погрешности этого этапа определяются факторами, влияющими на эффективность такого пересчета. В данной случае из существующих погрешностей навигационно-временных определений рассмотрим только геометрический фактор, входящий в состав погрешностей вторичной обработки радионавигационных сигналов в НАП.

На рисунке 9 представлен график значений геометрического фактора для возможных созвездий СРНС ГЛОНАСС на 17-витковом интервале с дискретностью измерения 1 минута, с 4 и более НКА в созвездии, в режиме: тип спутника ГЛОНАСС-К, частота L1 и МРЛ.

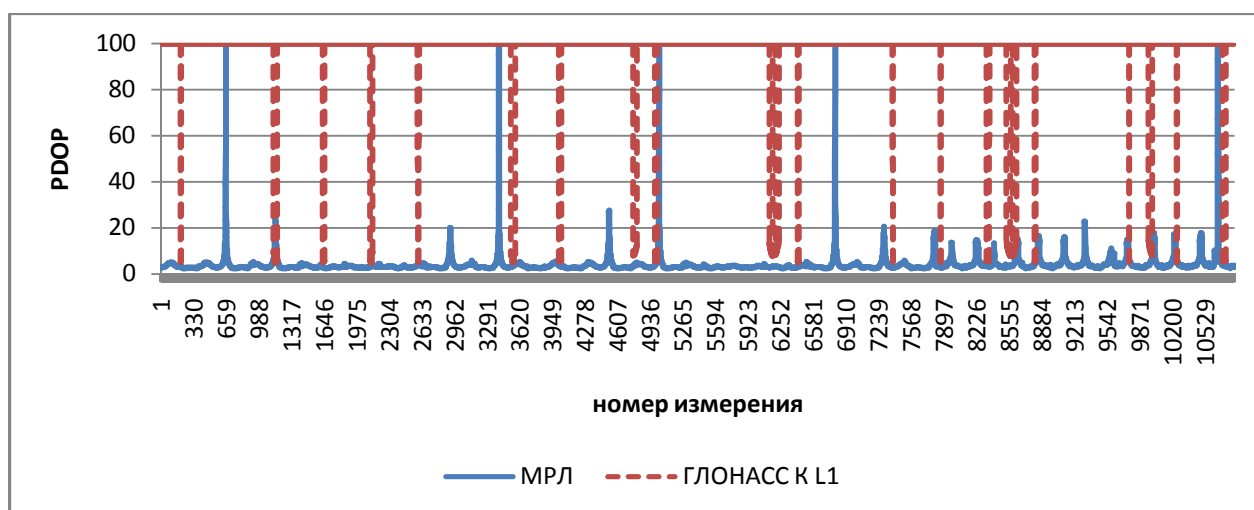


Рисунок 9 – Геометрический фактор в СРНС ГЛОНАСС в режиме: тип спутника ГЛОНАСС-К, частота L1 и МРЛ.

Исходя из полученных результатов можно заключить, что в режиме МРЛ на 17-витковом интервале с дискретностью измерения 1 минута с вероятностью 0,9 геометрический фактор будет не более 5 единиц на всем периоде измерения, без учета 10-минутного перерыва в передаче сигнала. В отличие от режима «тип спутника ГЛОНАСС-К, частота L1», где с вероятностью 0,9 геометрический фактор будет уже не более 12 единиц, где измерения бу-

дуг возможны только 4,88 % от всего периода времени 17-виткового интервала. Итоговые данные результатов экспериментальных исследований приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Точность позиционирования и измерения ориентации КА без учета и с учетом геометрического фактора(СКО).

Тип КА	$\sigma_x, \text{ м}$	$\sigma_y, \text{ м}$	$\sigma_z, \text{ м}$	$\sigma_v, \text{ м/с}$	$\sigma_\alpha,$ угл. мин	$\sigma_\beta,$ угл. мин	$\sigma_\gamma,$ угл. мин
КА на ГСО без учета геометрического фактора	4,424	7,991	5,466	0,0133	10,2	15,6	6,6
КА на ГСО с учетом геометрического фактора	22,122	39,957	27,332	-	-	-	-

Полученные результаты экспериментальных исследований приближаются к закону нормального распределения. Измеренные отклонения по уровням вероятностей 0,683 и 0,955 укладываются в соответствующие пределы $[m - \sigma, m + \sigma]$ и $[m - 2\sigma, m + 2\sigma]$, где m – математическое ожидание и σ – среднеквадратичное отклонение измеренных отклонений от расчетных значений навигационных параметров неподвижного КА на ГСО.

По результатам проведенных экспериментальных исследований были сделаны выводы о том, что разработанные методы высокоточной навигации и измерения пространственной ориентации КА на ГСО, основанные на использовании в составе бортовой аппаратуры КА многоканальных ГНСС-приемников обеспечивают:

- определение координат КА при использовании сигналов КА ГЛОНАСС и GPS с СКО менее 40 м;
- определение скорости с СКО менее 0,1 м/с;
- определение углов пространственной ориентации при использовании антенной системы с базовыми расстояниями между антенными модулями 0,7 м с систематической погрешностью менее 10' и СКО менее 16'.

Разработанные методы ускоренного разрешения фазовой неоднозначности обеспечивают разрешение фазовой неоднозначности одномоментными переборными методами при длине базы более 0,7 м и позволяют осуществлять измерение углов пространственной ориентации с высокой точностью.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Проведен анализ существующих методов и сформирована концепция для перспективных методов и средств высокоточной навигации КА при помощи ГНСС-приемников.

2. Проведенная оценка количества одновременно наблюдаемых НКА из точек стояния КА на ГСО показала, что задача навигации КА на ГСО классическими методами спутниковой радионавигации с использованием стандартных навигационных сигналов на частотах $L1$, $L2$ и $L3$ практически не решается из-за недостаточного количества одновременно наблюдаемых НКА и больших разрывов в радионавигационном поле. Наиболее предпочтительным методом определения координат и пространственной ориентации КА на ГСО является использование сигналов МРЛ.

3. Впервые теоретически обоснована и экспериментально подтверждена математическим моделированием целесообразность использования сигналов МРЛ для навигационных определений КА на ГСО и разработан метод высокоточного определения параметров движения на этой основе, что защищено патентом РФ [15].

4. Разработан новый метод измерения углов пространственной ориентации, позволяющий повысить помехоустойчивость и точность измерения радионавигационных параметров за счет применения АР.

5. Впервые разработан алгоритм разрешения фазовой неоднозначности, основанный на пеленгационном методе, обеспечивающий надежное разрешение фазовой неоднозначности и повышение точности измерения пространственной ориентации связанного с антенной системой объекта за счет большой избыточности измерений, что позволяет использовать переборные методы даже при достаточно длинных базах вследствие небольшого числа вариантов перебора.

6. Разработан программно-аппаратный комплекс моделирования бортовой навигационной системы и исследования методов высокоточной навигации КА, включающий в себя компьютерную модель бортовой навигационной системы (БНС) КА и навигационного поля в заданной точке орбиты КА на ГСО.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях по списку ВАК, а также входящие в базы данных Scopus и Web of Science:

1. The Use of Computer Models in the Software and Hardware Complex of Research Methods of Navigation Spacecrafts / V.N. Bondarev, D.D. Dmitriev, N.S. Kremez, V.N. Tyapkin // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2016, 9(3). pp. 302-309.

2. The probability distribution function for the sum of squares of independent random variables / Yu. Fateev, D. Dmitriev, V. Tyapkin, N. Kremez, V. Shaidurov // AIP Conference Proceedings, 2016. vol. 1759.

3. The Synthesis Algorithm for Spatial Filtering to Maintain a Constant Level of the Useful Signal / V.N. Tyapkin, D.D. Dmitriev, Yu.L. Fateev, N.S. Kremez // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics 2016, 9(2), 258–267.

4. Программно-аппаратный комплекс моделирования процессов позиционирования и измерения пространственной ориентации космических аппаратов на геостационарной орбите / Д.Д. Дмитриев, В.Н. Ратушняк, А.Б. Гладышев, Н.С. Кремез // Успехи современной радиоэлектроники.–2016.–№ 11. –С. 141–144.

5. Phase ambiguity resolution in the GLONASS/GPS navigation equipment, equipped with antenna arrays / Yu.L. Fateev, D.D. Dmitriev, V.N. Tyapkin, N.S. Kremez, V.N. Bondarev // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015.

6. The use of GNSS technologies for high-precision navigation geostationary spacecraft / Yu.L. Fateev, D.D. Dmitriev, V.N. Tyapkin, N.S. Kremez, V.N. Ratushnyak // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015.

7. Методы адаптации фазированных антенных решеток к помехам в спутниковых радионавигационных системах / Д.Д. Дмитриев, В.Н. Тяпкин, Н.С. Кремез // Радиотехника.–2013.–№ 9.–С. 39–43.

8. Фазовые измерения в угломерной аппаратуре ГЛОНАСС/GPS без разрешения фазовой неоднозначности / Ю.Л. Фатеев, Д.Д. Дмитриев, В.Н. Тяпкин, Н.С. Кремез // Научно-технические технологии. 2014.–Т. 15.–№ 9.–С. 16–19.

9. Пеленгационный метод измерения углов пространственной ориентации в навигационной аппаратуре ГЛОНАСС/GPS / Ю.Л. Фатеев, Д.Д. Дмитриев, В.Н. Тяпкин, Н.С. Кремез, И.В. Тяпкин // Научно-технические технологии. 2015. –Т. 16.–№ 3.–С. 86–90.

Полученные охранные документы на результаты интеллектуальной деятельности:

10. Патент 2618520 РФ, С1 МПК G01S1/00. Способ угловой ориентации объекта по радионавигационным сигналам космических аппаратов / В.Н. Тяпкин, В.Н. Ратушняк, Д.Д. Дмитриев, А.Б. Гладышев, Н.С. Кремез; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». – № 2016114995; заявл. 18.04.2016; опубл. 04.05.2017; бюл. № 13.

11. Патент 2580827 РФ, С1 МПК G01S1/00. Способ угловой ориентации объекта / В.Н. Ратушняк, Д.Д. Дмитриев, Ю.Л. Фатеев, В.Н. Тяпкин, Н.С. Кремез, Е.Н. Гарин ;заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – №2015105336/07; заявл. 17.02.2015; опубл. 10.04.2016; бюл. № 10.

12. Свидетельство № 2013660741 РФ. Программа для автоматизированного расчета параметров радионавигационного поля, создаваемого группировкой навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Н.С. Кремез, Д.Д. Дмитриев, В.Н. Тяпкин, Ю.Л. Фатеев ; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2013618834 ; заявл. 03.10.2013 ; зарегистр. 18.11.2013.

13. Свидетельство № 2015618057 РФ. Программа для автоматизированного расчета параметров навигационного поля космического аппарата в заданной точке геостационарной орбиты / Н.С. Кремез, Ю.Л. Фатеев, В.Н. Тяпкин, Д.Д. Дмитриев, Т.А. Марарескул; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2015612503 ; заявл. 02.04.2015 ; зарегистр. 29.07.2015.

14. Свидетельство № 2016616468 РФ. Компьютерная модель навигационного поля в заданной точке орбиты космических аппаратов на низких и геостационарных орбитах / Н.С. Кремез, Д.Д. Дмитриев, В.Н. Тяпкин, Ю.Л. Фатеев, А.Б. Гладышев ; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». – № 2016613970 ; заявл. 21.04.2016 ; зарегистр. 14.06.2016.

15. Свидетельство № 2016616586 РФ. Компьютерная модель бортовой навигационной системы космического аппарата, основанная на использовании многоканальных ГНСС-приемников / Н.С. Кремез, Д.Д. Дмитриев, В.Н. Тяпкин, Ю.Л. Фатеев, В.Н. Ратушняк ; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО

«Сибирский федеральный университет». – № 2016613927 ; заявл. 21.04.2016 ; зарегистр. 15.06.2016.

Труды в сборниках конференций:

16. Имитатор сигналов для угломерных ГНСС-приемников на основе современных модульных радиоизмерительных приборов / А.Б. Гладышев, Д.Д. Дмитриев, Н.С. Кремез, Е.Е. Гарин // Решетневские чтения : материалы XX Юбилейной междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2016. – С. 260–262.

17. Пеленгационный метод измерения углов пространственной ориентации по сигналам ГНСС / Ю.Л. Фатеев, В.Н. Тяпкин, Д.Д. Дмитриев, Н.С. Кремез, А.Б. Гладышев // Решетневские чтения : материалы XX Юбилейной междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2016. – С. 304–306.

18. Определение относительных координат объекта с помощью спутниковых средств радионавигации / Е.Н. Гарин, Д.Д. Дмитриев, В.И. Кокорин, Н.С. Кремез // Радиолокация, навигация и связь: сб. докл. конф. «RLNC-2006»: в 3-х т. Т. 3. – Воронеж: НПО «САКВОЕЕ» ООО, 2006. – С. 1776–1784.

19. Определение пространственной ориентации объектов с помощью спутниковых систем радионавигации / Е.Н. Гарин, Д.Д. Дмитриев, Н.С. Кремез // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. / ред. : А. И. Громыко, А. В. Сарафанов. – М. : Радио и связь, 2006. – С. 441–444.

Кремез Николай Сергеевич

Разработка методов определения движения космического аппарата
в бортовой радионавигационной системе с использованием сигналов
межспутниковой радиолинии ГЛОНАСС:

Автореферат диссертации на соискание
учёной степени кандидата технических наук.

Подписано в печать _____.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1.

Тираж 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано в типографии БИК СФУ
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а