

На правах рукописи



КРИНИЦКИЙ ГЕОРГИЙ ВИКТОРОВИЧ

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТУПНОСТИ,
НЕПРЕРЫВНОСТИ И ЦЕЛОСТНОСТИ НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ПРИ КАТЕГОРИРОВАННОЙ ПОСАДКЕ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРНС**

Специальность 05.22.13 – Навигация и управление воздушным движением

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

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА).

Научный руководитель	Доктор технических наук, профессор, Главный специалист Секретариата Ученого совета ФГУП ГосНИИ ГА, Почетный работник науки и техники РФ, Рубцов Виталий Дмитриевич.
Официальные оппоненты	Заведующий кафедрой «Навигационного обеспечения полетов и аэронавигационной информации» Некоммерческого образовательного учреждения дополнительного профессионального образования «Институт аэронавигации», доктор технических наук, доцент, Борсоев Владимир Александрович. Начальник 32 научно-исследовательского отдела ФГБУ ЦНИИ ВВС (Минобороны России), кандидат технических наук, Устюжанин Дмитрий Александрович.
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации» (ФГБОУ ВО СПбГУ ГА)

Защита состоится «27» октября 2021 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д223.011.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) по адресу: 125993, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО МГТУ ГА и на сайте ФГБОУ ВО МГТУ ГА www.mstuca.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 223.011.01,
Доктор технических наук, профессор

Самойленко В. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Условия и средства обеспечения посадки воздушных судов (ВС) существеннейшим образом влияют на безопасность и регулярность полетов ВС, а также на экономические показатели авиационной транспортной системы в целом.

Настоящая работа посвящена методам оценки и повышения точности, доступности, непрерывности и целостности навигационного обеспечения категорированной посадки ВС по сигналам спутниковых радионавигационных систем (СРНС) с целью удовлетворения соответствующих высоких требований для ее обеспечения в условиях различных внешних воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки ВС.

Заход на посадку ВС является крайне ответственной операцией, поэтому необходима высокая точность, доступность, непрерывность и целостность навигационного обеспечения посадки с использованием СРНС.

Во многих странах мира внедрены системы посадки ВС с использованием СРНС, обеспечивающие категорированный заход на посадку.

Это обусловлено следующими технико-экономическими причинами:

1. Системы типа СП-75 (ILS) громоздки, их размещение на аэродромах со сложным рельефом местности затруднено.

2. Обеспечение захода на посадку ВС с нескольких направлений требует оснащения аэродрома несколькими комплектами аппаратуры СП-75.

3. Спутниковые системы позволяют обслуживать все направления заходов всех взлетно-посадочных полос (ВПП) одного или даже нескольких близлежащих аэродромов.

Требования к таким системам сформулированы в рекомендациях ИКАО (SARPs). Кроме того, в России действует ряд соответствующих нормативных документов: Радионавигационный план РФ, Квалификационные требования к авиационной бортовой навигационной аппаратуре потребителей и к системам наземных функциональных дополнений СРНС.

Во многих странах активно проводятся исследования в части совершенствования характеристик систем посадки ВС с использованием СРНС.

В связи с тем, что устойчивость аппаратуры потребителей (АП) СРНС к воздействию различных помех невысока, она может стать легкой мишенью в условиях террористических угроз, а также является уязвимой для других противоправных действий, так как устройства, предназначенные для подавления сигналов СРНС, можно легко приобрести или изготовить самостоятельно, даже не имея высокой профессиональной подготовки в данной области.

Также известны случаи установки недобросовестными сотрудниками автотранспортных компаний на транспортные средства малогабаритных постановщиков помех для блокирования возможности мониторинга их передвижения, которые оказывали влияние на функционирование бортовой АП СРНС ВС на аэродроме, вблизи которого находилась автомагистраль.

В связи с изложенным выше можно утверждать, что наиболее важным направлением совершенствования систем, обеспечивающих заход на посадку с использованием СРНС является повышение доступности, непрерывности и целостности навигационного обеспечения в условиях внешних воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки воздушных судов.

Степень разработанности темы исследования

Общий подход к оценке точности и доступности навигационного обеспечения при заходе ВС на посадку изложен в рекомендациях ИКАО. Однако он не учитывает возможные внешние воздействия, приводящие к нарушению работоспособности системы посадки воздушных судов, а характеристики погрешностей бортовой и наземной СРНС в рекомендациях ИКАО определяются опытным путем.

Опубликован ряд научных работ в области разработки методов обеспечения работы АП СРНС условиях внешних воздействий, приводящих к нарушению работоспособности

системы посадки ВС, проведенных в России сотрудниками Военно-воздушной академии им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ОАО «ВНИИР-Прогресс», Центрального научно-исследовательского института Военно-воздушных сил Министерства обороны Российской Федерации, филиала АО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» «Научно-исследовательского института космического приборостроения», Государственного научно-исследовательского института авиационных систем, Научно-исследовательского института физико-технических и радио-технических измерений и др. (Тяпкин В.Н., Дмитриев Д.Д., Коннов В.Г., Быстраков С.Г., Соловьев Ю.А., Устюжанин Д.А. Пастухов А.В., Ворончихин Д.Н., Ефименко В.С., Харисов В.Н., Немов А.В., Соколов И.М., Кинкулькин И.Е., Ю.С. Яскин). Кроме того, исследования в этой области активно проводятся в зарубежных странах представителями компаний Rockwell Collins, Honeywell (Bartone C., Stansell T., Brown A., Mathews B., Vagle N., Broumandan A., Jafarnia A., Lachapelle G., Chuang Y. C., Gupta I. J., Dick C., Harris F., O'Brien J., Weiss J. P.) и многими другими.

Однако, в упомянутых научных работах рассматривались вопросы обеспечения доступности и точности навигационного обеспечения ВС при заходе на посадку по сигналам СРНС без учета характеристик алгоритмов работы в условиях внешних воздействий, приводящих к нарушению работоспособности АП СРНС, и особенностей методов оценки навигационных параметров в таких условиях.

Ряд методик, учитывающих влияние внешних воздействий на качество приема сигналов навигационных космических аппаратов (НКА) в АП СРНС, предложен в работах Соловьева Ю.А., Быстракова С.Г., Устюжанина Д.А. Но предложенные методики не учитывают погрешности оценки навигационных параметров с учетом особенностей методов их измерения, применяемых в АП СРНС.

Цели исследования

Целью исследования является разработка методов повышения доступности, непрерывности и целостности навигационного обеспечения воздушных судов при категорированной посадке с использованием сигналов СРНС в условиях внешних воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки воздушных судов..

Задачи исследования:

- 1) исследование существующих, и разработка новых алгоритмов обработки навигационной информации в условиях, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки ВС;
- 2) разработка алгоритмов, обеспечивающих возможность автоматического перехода к использованию диапазонов частот СРНС, свободных от внешних воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки ВС;
- 3) разработка методов снижения влияния подстилающей поверхности и местных предметов на качество спутниковой навигации для обеспечения точного захода ВС на посадку;
- 4) разработка методов оценки дифференциальных поправок и их составляющих с использованием оптимальной линейной фильтрации навигационных параметров;
- 5) разработка методов оценки точности и доступности навигационного обеспечения категорированной посадки ВС с использованием СРНС.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются системы посадки ВС с использованием СРНС.

Предмет исследования - характеристики точности, непрерывности и доступности навигационного обеспечения категорированной посадки воздушных судов с использованием СРНС.

Методы исследований

С целью решения вышеперечисленных задач использованы методы математического и полунатурного моделирования, цифровой обработки сигналов, методы теории вероятностей и случайных процессов.

Научная новизна работы:

1. Разработан адаптивный алгоритм работы наземной и бортовой аппаратуры потребителей СРНС с использованием корреляционной обработки информации, поступающей от первичных навигационных датчиков, обеспечивающий снижение влияния воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки воздушных судов.

2. Разработан метод оценки дифференциальных поправок и их составляющих с использованием оптимальной линейной фильтрации навигационных параметров, базирующийся на принципах оптимальной линейной фильтрации (Калмана), который позволит обеспечить достаточную точность, доступность, непрерывность навигационного обеспечения для решения задач категорированной посадки воздушных судов с использованием СРНС в условиях, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки воздушных судов.

3. Предложена усовершенствованная методика оценки точности и доступности навигационного обеспечения при категорированной посадке ВС с использованием СРНС, позволяющая расчетным путем оценить характеристики навигационного обеспечения с учетом географического расположения аэродрома и ожидаемых внешних воздействий.

Практическая значимость исследования

Использование полученных в диссертации научных результатов при разработке и эксплуатации авиационной АП СРНС и локальных контрольно-корректирующих станций (ЛККС) позволяют:

- повысить точность, доступность и непрерывность навигационного обеспечения категорированной посадки ВС с использованием СРНС в условиях воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы;
- произвести оценку точности и доступности навигационного обеспечения расчетным путем при планировании размещения ЛККС на аэродромах с учетом расположения аэродрома и модели предполагаемых внешних воздействий.

Достоверность и обоснованность

Достоверность полученных научных результатов основана на корректном использовании известных методов математического и полунатурного моделирования для оценки эффективности разработанных алгоритмов, методов и методик, а также на сравнительном анализе результатов моделирования и экспериментальных исследований точностных характеристик системы посадки воздушных судов с использованием СРНС в условиях влияния воздействий, приводящих к нарушению ее работоспособности.

Личный вклад автора

Автором лично:

- разработан адаптивный алгоритм работы наземной и бортовой аппаратуры потребителей СРНС с использованием корреляционной обработки информации, поступающей от первичных навигационных датчиков, обеспечивающий снижение влияния воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки ВС;
- разработан метод оценки дифференциальных поправок и их составляющих с использованием оптимальной линейной фильтрации навигационных параметров;
- разработана методика оценки точности, доступности навигационного обеспечения категорированной посадки, позволяющая учитывать условия эксплуатации АП СРНС;
- получены результаты математического и полунатурного моделирования предложенных методов оценки и повышения надежности навигационного обеспечения категорированной посадки ВС с использованием СРНС.

На защиту выносятся:

1. Адаптивный алгоритм работы наземной и бортовой аппаратуры потребителей СРНС с использованием корреляционной обработки информации, поступающей от первичных навигационных датчиков, обеспечивающий снижение влияния воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки ВС;

2. Метод оценки дифференциальных поправок и их составляющих с использованием оптимальной линейной фильтрации навигационных параметров;
3. Методика оценки точности, доступности навигационного обеспечения категорированной посадки ВС, позволяющая учитывать условия эксплуатации АП СРНС;
4. Результаты математического и полунатурного моделирования предложенных методов оценки и повышения надежности навигационного обеспечения категорированной посадки ВС с использованием СРНС.

Реализация результатов работы

Основные результаты работы внедрены в АО «Московское конструкторское бюро «Компас» при разработке помехозащищенной авиационной локальной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS в части метода повышения устойчивости работы аппаратуры в условиях внешних воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки ВС, и методики оценки точности и доступности навигационного обеспечения при заходе на посадку по сигналам спутниковых радионавигационных систем, а также в АО «Аэроприбор-Восход» при разработке помехозащищенной АП СРНС, предназначенной для ВС государственной авиации.

Апробация работы и публикации

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на 11-й Международной научно-технической конференции «Тенденции и гармонизация развития радионавигационного обеспечения» Межгосударственного совета «Радионавигация», Российского общественного института навигации (РОИН) и Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (Москва, МАДИ, 2016 г.); на конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики – 2010» Московского Авиационного института (Москва, МАИ, 2010 г.), на конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики – 2011» (Москва, МАИ, 2011 г.); на конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики – 2013» (Москва, МАИ, 2013 г.), на международной конференции IAA/AAS SciTech Forum on Space Flight Mechanics and Space Structures and Materials (Москва, Российский университет дружбы народов, 2019 г.), на научно-практической конференции «Проблемы энергетического и машиностроительного промышленных комплексов» на базе департамента транспорта Инженерной академии и департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии Российского университета дружбы народов (Москва, РУДН, 2021 г.).

По материалам работы опубликованы в 6 научных статьях (34 стр.), 4 из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России (24 стр.), 5 публикаций в трудах международных и всероссийских конференций.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы.

Объем работы составляет 105 страниц текста.

Диссертация содержит 8 таблиц, 49 рисунков, а также список литературы из 82 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы. В связи с тем, что заход на посадку и посадка ВС являются крайне ответственными операциями, отмечена необходимость обеспечения высокой точности, доступности, непрерывности и целостности навигационного обеспечения посадки по сигналам СРНС.

При отсутствии специальных мер для обеспечения работы в условиях внешних воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки ВС, навигационная аппаратура становится доступной мишенью для террористических,

диверсионных и иных противоправных действий ввиду простоты и компактности устройств постановки помех для СРНС.

Выделен ряд направлений совершенствования бортовой АП СРНС и ЛККС для повышения точности, доступности, непрерывности и целостности в условиях внешних воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки ВС.

Сформулированы цель работы и основные задачи, решение которых направлено на ее достижение, научная новизна и практическая ценность. Приводятся положения, выносимые на защиту, сведения о реализации и внедрении результатов работы, а также о публикациях автора по теме работы.

В разделе 1 диссертационной работы приведены требования к точности определения координат ВС при заходе на посадку и посадке по категориям ИКАО. Дано описание и характеристики ряда систем, применяемых для обеспечения захода на посадку и посадки воздушных судов Российской Федерации и других стран. Кроме того, приведены требования к навигационному обеспечению ВС при заходе на посадку по сигналам СРНС, а также характеристики таких систем, разработанных как в РФ, так и за рубежом, в том числе системы JPALS (США), предназначенной для использования государственной авиацией США и стран НАТО. Однако, разработанные в РФ локальные дифференциальные подсистемы посадки в настоящее время не обеспечивают работу в условиях ряда внешних воздействий, приводящих к нарушению работоспособности СРНС. Отмечено, что существует необходимость совершенствования систем обеспечения захода на посадку по сигналам СРНС, применяемых в гражданской и государственной авиации РФ, в части обеспечения их функционирования в условиях воздействия организованных и непреднамеренных радиопомех, с целью сохранения надежной работы систем посадки ВС в условиях угроз террористических, хулиганских и других противоправных действий.

Приведены определения основных параметров навигационного обеспечения, а также описание факторов, влияющих на них.

Проведен анализ влияния выбора рабочего созвездия СРНС на характеристики навигационного обеспечения ВС при заходе на посадку.

Проведена оценка точности и доступности определения положения воздушного ВС в точке принятия решения на расстоянии 400 м от ЛККС. Представлены графики зависимостей точности и доступности от ограничения рабочего созвездия по углу возвышения НКА. Результат проведенных расчетов показывает, что максимальная величина угла ограничения созвездия НКА, по которому производится определение навигационных параметров, при которой не наблюдается существенное снижение доступности навигационного обеспечения, существенно зависит от географического расположения ЛККС и ВС при заходе на посадку. Таким образом, выбор угла ограничения созвездия («маски угла возвышения») в ЛККС с учетом географического расположения аэродрома, позволит минимизировать погрешности определения навигационных параметров при сохранении доступности навигационного обеспечения без изменения алгоритмов функционирования ЛККС.

Отмечено, что методики, учитывающие влияние подстилающей поверхности и местных предметов, а также влияние посторонних сигналов в полосе СРНС на характеристики навигационного обеспечения ВС при заходе на посадку с использованием СРНС, были предложены в работах ряда авторов. Но в них не учитывается изменение погрешности оценки дифференциальных поправок в ЛККС и погрешности оценки псевдодальностей в бортовой АП СРНС при применении алгоритмов пространственно-временной селекции сигналов.

Для более точной оценки доступности навигационного обеспечения посадки ВС по СРНС в условиях воздействия факторов, вызывающих нарушение работы АП СРНС, разработана методика, учитывающая характеристики алгоритмов обработки навигационной информации, применяемых в АП СРНС и ЛККС.

Разработана методика оценки точности и доступности навигационного обеспечения при заходе на посадку по сигналам СРНС, позволяющая расчетным путем оценить характеристики навигационного обеспечения с учетом географического расположения аэродрома, ожидаемых внешних воздействий и характеристик алгоритмов обработки навигационной информации, применяемых в бортовой АП СРНС и наземной ЛККС.

Структурная схема предлагаемой расширенной методики приведена на рисунке 1.

Проведен расчет уровней защиты и доступности навигационного обеспечения в условиях сильного влияния местных предметов и элементов конструкции ВС по предложенной методике при использовании алгоритма обработки навигационной информации (приведенного в разделе 3) в бортовой АП СРНС и наземной ЛККС.

Рассмотрен случай захода на посадку по категории I на аэродроме, расположенном на территории Московской области.

На рисунке 2 приведены результаты расчета уровней при работе по ГЛОНАСС и GPS в нормальных условиях приема.

Рассмотрен случай работы бортовой АП СРНС и наземной ЛККС при заходе ВС на посадку в условиях присутствия отраженных сигналов от местных предметов и элементов конструкции ВС при использовании стандартных алгоритмов обработки навигационной информации, не учитывающих пространственное расположение НКА, источников посторонних излучений, местных предметов и элементов конструкции ВС и ЛККС, негативно влияющих на качество работы бортовой и наземной АП СРНС. Предполагается, что сигнал каждого НКА отражается от местных предметов в четырех точках, удаленных от АП СРНС или ЛККС на различные расстояния от 15 м до 100 м.

На рисунке 3 приведены результаты расчета уровней защиты в условиях присутствия отраженных сигналов от местных предметов и элементов конструкции ВС.

На рисунке 4 приведены результаты расчета уровней защиты по предложенной методике в аналогичных условиях при применении алгоритма обработки навигационной информации (приведенных в разделах 2 и 3) в бортовой АП СРНС и наземной ЛККС.

С целью оценки эффективности алгоритма адаптивной пространственно-временной обработки навигационной информации в части обеспечения требуемого уровня доступности навигационного обеспечения при воздействии факторов, нарушающих работу АП СРНС, проведен расчет показателя доступности (эксплуатационной готовности) на основе полученных значений уровней защиты при его применении.

Результаты расчета доступности навигационного обеспечения при работе в различных условиях отражены в таблице 1.

Результаты расчета доступности навигационного обеспечения категоризированной посадки ВС по СРНС с использованием алгоритма обработки навигационной информации, предложенного в разделе 3, как в АП СРНС на борту ВС, так и в аэродромной ЛККС, показали снижение уровней погрешности измерения дифференциальных поправок и псевдодальностей в условиях влияния элементов конструкции ВС, подстилающей поверхности и местных предметов, а также в условиях внешних воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки ВС.

В рамках внедрения разработанных методов и алгоритмов при разработке авиационной локальной дифференциальной подсистемы посадки летательных аппаратов специальных потребителей в АО «МКБ «Компас» была проведена экспериментальная проверка.

Для проведения сравнительной оценки производилось переключение изделия в режим работы с использованием алгоритма адаптивной пространственно-временной обработки навигационной информации.

При этом наблюдалось снижение шумовых погрешностей определения навигационных параметров и дифференциальных поправок, а также повышение соотношения сигнал-шум при приеме НКА СРНС ГЛОНАСС.

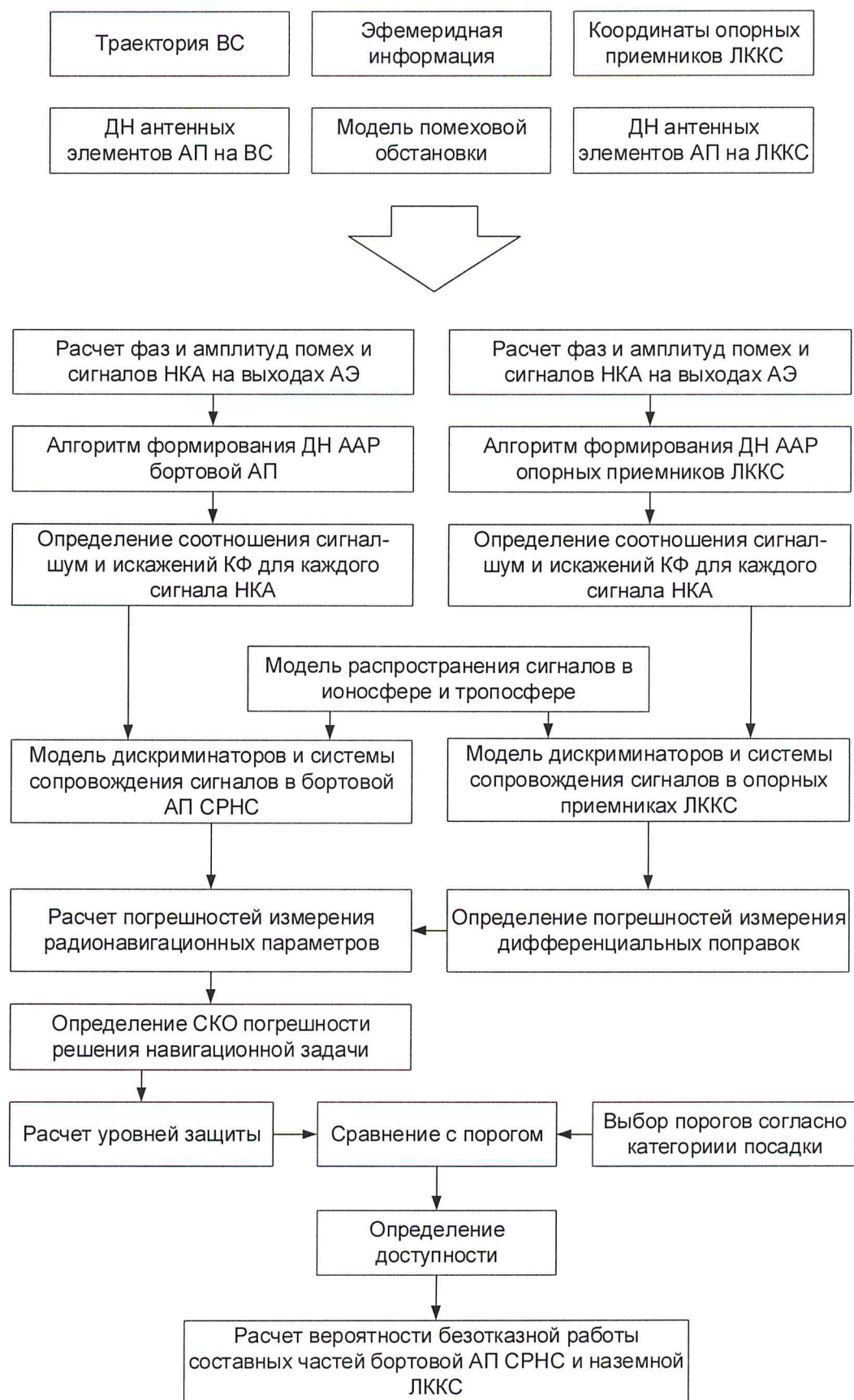


Рисунок 1 - Структурная схема методики оценки точности и доступности навигационного обеспечения при заходе на посадку по СРНС

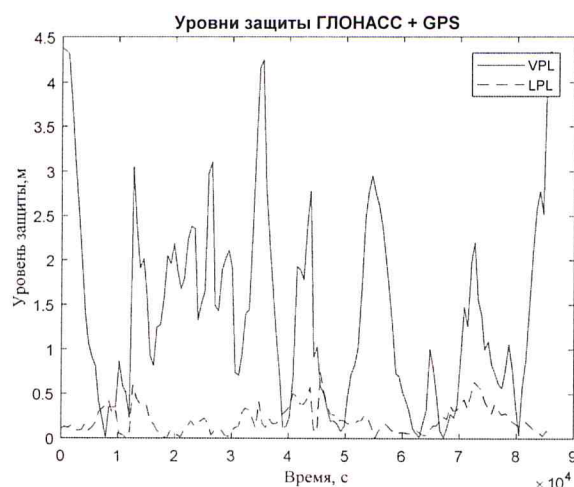


Рисунок 2 - Уровни защиты по вертикали (VPL) и горизонтали (HPL) при работе по ГЛОНАСС и GPS в нормальных условиях приема

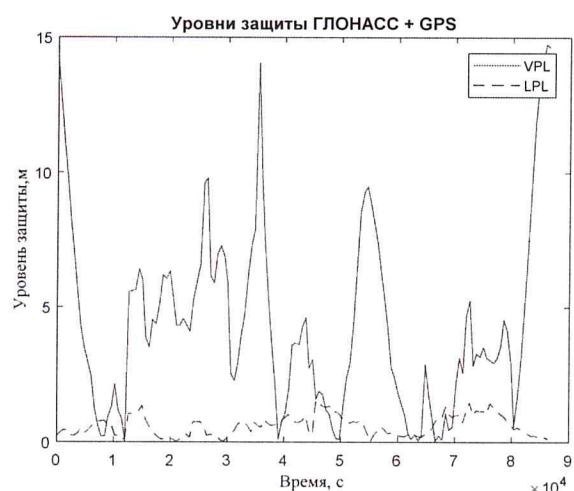


Рисунок 3 - Уровни защиты по вертикали (VPL) и горизонтали (HPL) при совместной работе по ГЛОНАСС и GPS в условиях влияния местных предметов и элементов конструкции ВС

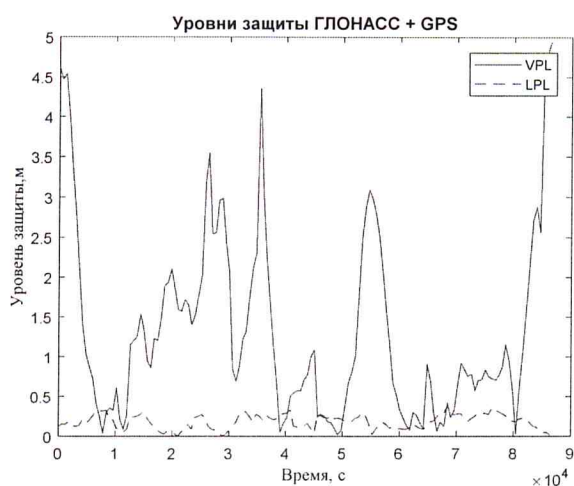


Рисунок 4 - Уровни защиты по вертикали (VPL) и горизонтали (HPL) при совместной работе по ГЛОНАСС и GPS в условиях влияния местных предметов и элементов конструкции ВС при применении алгоритмов обработки навигационной информации, приведенных в разделах 2 и 3.

Таблица 1 - Доступность навигационного обеспечения, %

	GPS	ГЛОНАСС	ГЛОНАСС + GPS
Доступность навигационного обеспечения в нормальных условиях приема	>99	97	>99
Доступность навигационного обеспечения в условиях воздействия постороннего сигнала	83	68	98
Доступность навигационного обеспечения в условиях воздействия постороннего сигнала при применении алгоритма адаптивной пространственно-временной обработки навигационной информации	99	95	>99
Доступность навигационного обеспечения в условиях влияния местных предметов и элементов конструкции	64	46	93
Доступность навигационного обеспечения в условиях влияния местных предметов и элементов конструкции при применении алгоритма адаптивной пространственно-временной обработки навигационной информации	>99	>99	>99

Результаты сравнения погрешностей и качества приема сигналов приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Сравнение погрешностей и качества приема сигналов

Лит.	Угол возв.	ОСШ, дБ (станд. режим)	ОСШ, дБ (предложенный алгоритм)	СКО, м (станд. режим)	СКО, м (предложенный алгоритм)
1	76	38,5	47,0	0,4	0,1
-5	21	42,5	51,0	0,3	0,2
-2	23	38,5	45,5	0,4	0,1
-7	38	41,0	49,0	0,3	0,3
-1	55	33,5	43,0	0,6	0,2
4	15	37,5	45,5	0,4	0,2
2	26	40,5	49,0	0,4	0,1

Сравнение результатов показало увеличение соотношения спектральной плотности несущей частоты НКА к шуму на 7..9 дБ и снижение среднеквадратического отклонения шумовой составляющей погрешности измерения дифференциальных поправок в 2..4 раза, что позволяет повысить точность и доступность навигационного обеспечения, так как позволяет обеспечить приемлемую точность даже при ухудшении геометрического фактора рабочего созвездия НКА.

Для проверки эффективности работы предложенного алгоритма в условиях, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки ВС, на антенную систему блока приема сигналов СРНС был подан шумоподобный сигнал в полосе ГЛОНАСС. Уровень мощности сигнала был выбран таким, что при работе в стандартном режиме (без применения алгоритма адаптивной пространственно-временной обработки навигационной информации) прием сигналов СРНС не обеспечивался.

При этом величина соотношения сигнал-шум снижалась незначительно (относительно работы в нормальных условиях с использованием предложенного алгоритма), среднеквадратическое отклонение шумовой составляющей погрешности измерения

дифференциальных поправок незначительно возросло. Результаты сравнения погрешностей и качества приема сигналов в условиях, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки ВС приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Сравнение погрешностей и качества приема сигналов в условиях, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки воздушных судов

Лит.	Угол возв.	ОСШ, дБ (нормальные условия)	ОСШ, дБ (внешнее воздействие)	СКО, м (нормальные условия)	СКО, м (внешнее воздействие)
1	76	47,0	46,0	0,1	0,2
-5	21	51,0	47,5	0,1	0,1
-2	23	45,5	42,5	0,2	0,3
-7	38	49,0	44,0	0,1	0,2
-1	55	43,0	41,5	0,3	0,3
4	15	45,5	42,5	0,2	0,3
2	26	49,0	45,5	0,1	0,2

На основании результатов, полученных в разделе 1, можно сделать следующие выводы:

1. Отбор сигналов НКА по углу возвышения позволит без существенного изменения алгоритмов функционирования бортовой АП СРНС и ЛККС повысить ее точность при соблюдении требований по доступности.

2. Предлагаемая методика позволяет произвести оценку доступности навигационного обеспечения посадки ВС по СРНС с учетом географического расположения аэродрома, траектории захода на посадку, ожидаемых внешних воздействий и характеристик алгоритмов обработки навигационной информации, применяемых в бортовой АП СРНС и наземной ЛККС.

3. Результаты моделирования показывают существенное снижение характеристик навигационного обеспечения как в результате внешних воздействий, так за счет влияния местных предметов и элементов конструкции ВС. Наблюдается повышение характеристик навигационного обеспечения во всех случаях при работе по двум СРНС совместно. Показано повышение характеристик навигационного обеспечения при применении алгоритмов обработки навигационной информации, приведенных в разделах 2 и 3, как в условиях внешних воздействий, так и в условиях сильного влияния местных предметов и элементов конструкции ВС.

В разделе 2 диссертационной работы представлено описание и проведена оценка характеристик предложенных алгоритмов поиска сигналов в условиях ограниченного временного ресурса и влияния воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки ВС. Представлены результаты полунатурного и математического моделирования. Проработан вопрос аппаратной реализации алгоритмов, произведена оценка требуемых аппаратных ресурсов при реализации с использованием программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Кроме того, Проведена оценка времени выполнения на цифровом сигнальном процессоре 1892ВМ10Я (НПЦ «Элвис»).

Предложен метод оценки дифференциальных поправок и их составляющих с использованием оптимальной линейной фильтрации навигационных параметров, базирующийся на методе оптимальной линейной фильтрации Калмана, позволяющий повысить точность, доступность, непрерывность навигационного обеспечения для решения задач категорированной посадки ВС с использованием СРНС в условиях, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки воздушных судов. Представлены результаты математического моделирования работы предложенного метода.

С учетом того, что СРНС обеспечивают излучение навигационных сигналов в двух и более диапазонах частот в работе предложен алгоритм работы локальных дифференциальных

подсистем, позволяющий в случае невозможности приема сигналов в некоторых диапазонах частот, работать по сигналам, излучаемым в диапазонах, свободных от помех. Данный подход позволяет предотвратить существенное снижение точности, доступности и непрерывности навигационного обеспечения при воздействии помех в ограниченном количестве частотных диапазонов СРНС.

Как правило, при определении дифференциальных поправок в наземной контрольно-корректирующей станции для каждого диапазона рабочих частот и измерения задержки сигнала в ионосфере измеряются псевдодалности каждого НКА в каждом частотном диапазоне. Кроме того, в АП СРНС, обеспечивающей прием и обработку сигналов НКА в двух или трех диапазонах частот, сопровождение нескольких сигналов, излучаемых одним и тем же НКА, производится набором независимых следящих систем. При этом вычисление ионосферной поправки и сглаживание измерений производится после измерения параметров сигналов в каждом диапазоне частот. Однако, в данном подходе не учитывается, что дисперсии погрешностей измерения псевдодалностей и псевдофаз, при измерении в разных диапазонах частот могут различаться за счет внешних воздействий (помех различного происхождения). Неравенство величин измеряемых радионавигационных параметров обусловлены частотной зависимостью групповой и фазовой скоростей распространения радиоволн в ионосфере и наличием независимых шумов измерений. Шумы измерений в различных диапазонах частот являются независимыми в силу того, что широкополосные шумы антенных усилителей, которыми в основном вызваны шумовые погрешности измерений, является физически независимыми в разных диапазонах частот.

С учетом информации о взаимосвязях измеряемых величин и независимости шумов измерений, в работе предложено использование метода оптимальной линейной фильтрации для обеспечения совместного сопровождения сигнала НКА в нескольких диапазонах частот и оценки величины дифференциальной поправки и параметров ионосферы.

Коэффициент преломления радиоволн n_f в ионосфере:

$$n_f = 1 + 40,3 EC \frac{1}{f^2} \quad (1)$$

где EC - концентрация электронов на пути распространения, f - частота сигнала.

При измерении дифференциальных поправок по одному навигационному спутнику в трех частотных диапазонах их величину можно выразить как

$$\begin{aligned} PRC_{L1} &= PR_{L1} - PR = \frac{40,3}{f_{L1}^2} IEC + N_{L1} + \tau + \Delta s_{trop} + \varepsilon, \\ PRC_{L1} &= PR_{L1} - PR = \frac{40,3}{f_{L1}^2} IEC + N_{L1} + \tau + \Delta s_{trop} + \varepsilon, \\ PRC_{L1} &= PR_{L1} - PR = \frac{40,3}{f_{L1}^2} IEC + N_{L1} + \tau + \Delta s_{trop} + \varepsilon, \end{aligned} \quad (2)$$

где PRC_{Li} , $i=1, 2, 3$ - дифференциальная поправка, PR - расчетная псевдодалность. Тогда

$$\begin{aligned} PRC_{L1} &= PR_{L1} - PR = \frac{40,3}{f_{L1}^2} IEC + N_{L1} + PRC, \\ PRC_{L2} &= PR_{L2} - PR = \frac{40,3}{f_{L2}^2} IEC + N_{L2} + PRC, \\ PRC_{L3} &= PR_{L3} - PR = \frac{40,3}{f_{L3}^2} IEC + N_{L3} + PRC. \end{aligned} \quad (3)$$

Из выражений (3) следует, что величины IEC и PRC , имеющие различный характер изменения, позволяют определить значения поправок во всех частотных диапазонах.

В данном случае применяется алгоритм оптимальной линейной фильтрации (Калмана).

Тогда вектор состояния в момент времени $t_k = k\Delta t$, равен

$$X_k^T = [PRC_k \quad IEC_k \quad RRC_k \quad IECR_k] \quad (4)$$

где PRC_k - составляющая поправки, обусловленная погрешностью часов спутника и погрешностью параметров его траектории, IEC_k - величина концентрации электронов в ионосфере, RRC_k и $IECR_k$ - скорость их изменения.

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где Δt - длительность интервала измерения.

Тогда

$$X_k = FX_{k-1} + W_k. \quad (6)$$

Вектор измерений имеет вид:

$$Z_k^T = [PR_{L1k} \quad PR_{L2k} \quad PR_{L3k} \quad f_{L1k} \quad f_{L2k} \quad f_{L3k}]. \quad (7)$$

Матрица, отражающая соотношение измерений и состояний:

$$H^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{40,3}{f_{L1}^2} & \frac{40,3}{f_{L2}^2} & \frac{40,3}{f_{L3}^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{f_{L1}}{c} & \frac{f_{L2}}{c} & \frac{f_{L3}}{c} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{40,3}{cf_{L1}} & -\frac{40,3}{cf_{L2}} & -\frac{40,3}{cf_{L3}} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где f_{Li} - частота излучения навигационного спутника, c - скорость света,

Далее в работе использовалась последовательность вычислений согласно алгоритму Калмана.

Оценки значений интегральной концентрации электронов (ИКЭ), полученные при использовании предложенного в работе алгоритма фильтрации, позволяют обнаружить возмущения в ионосфере, приводящие к снижению целостности навигационных определений.

Результаты математического моделирования предложенного алгоритма фильтрации с целью проверки устойчивости его работы приведены на рисунках 5 и 6.

На рисунке 5 приведена погрешность измерения дифференциальной поправки при использовании предложенного алгоритма при условии равного и соответствующего номинальному уровня шумов во всех диапазонах частот.

На рисунке 6 приведена погрешность измерения дифференциальной поправки при использовании предложенного алгоритма условиях, когда уровень шумов в диапазоне L2 выше номинального на 15 дБ.

Показано, что при использовании предложенного алгоритма учет оценки уровня шумов в каждом диапазоне позволяет обеспечить наиболее эффективную оценку дифференциальных поправок и параметров ионосферы при работе в двух и более диапазонах частот СРНС.

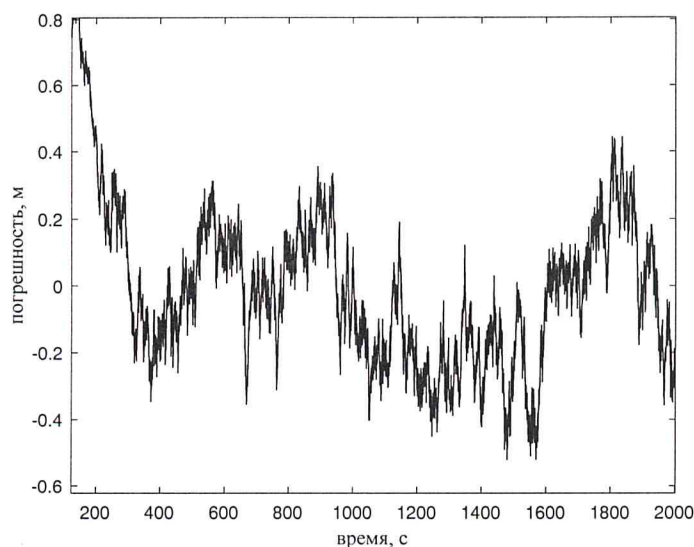


Рисунок 5 - Погрешность измерения дифференциальной поправки при использовании предложенного алгоритма при условии равного и соответствующего номинальному уровня шумов во всех диапазонах частот, м

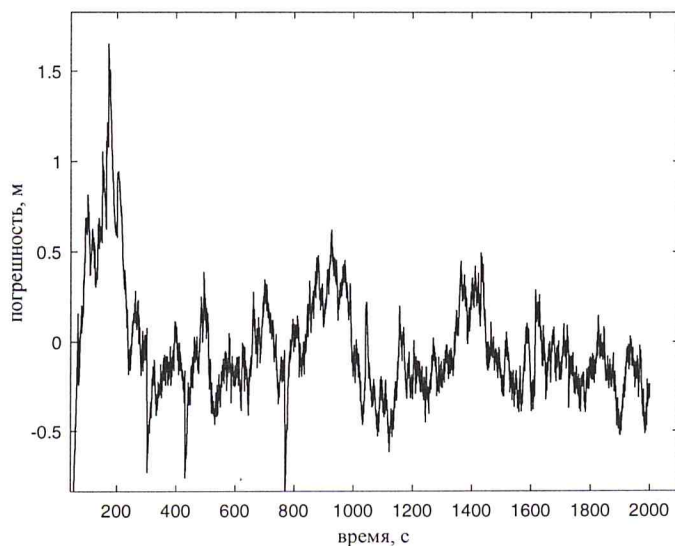


Рисунок 6 - погрешность измерения дифференциальной поправки при использовании предложенного алгоритма условиях, когда уровень шумов в диапазоне L2 выше номинального на 15 дБ

На основании результатов, представленных в разделе 2, можно сделать следующие выводы:

1. Передача в бортовую АП СРНС значения концентрации электронов в ионосфере, определенного в аэродромной ЛККС путем измерений в нескольких диапазонах частот позволяет снизить погрешности определения координат ВС в дифференциальном режиме

СРНС при заходе на посадку, вызванные возмущениями в ионосфере, путем учета разности между ИКЭ, определенной в ЛККС и бортовой АП СРНС.

2. Передача в бортовую АП СРНС значения ИКЭ позволяет уменьшить объем передаваемой информации при работе в нескольких диапазонах излучения СРНС, так как достаточно передать на борт поправки для одного сигнала, и учесть различие времени распространения в ионосфере в соответствии со значением полученной ИКЭ.

3. Результаты моделирования предложенного алгоритма адаптивной фильтрации при определении дифференциальных поправок показывают устойчивую работу АП СРНС в условиях, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки воздушных судов, а также подтверждают, что применение предложенного алгоритма позволит снизить погрешности определения дифференциальных поправок в нормальных условиях работы АП СРНС, а, следовательно, повысить точность, доступность, и целостность навигационного обеспечения ВС при заходе на посадку с использованием СРНС.

В разделе 3 рассматриваются вопросы применения алгоритмов пространственно-временной селекции, обеспечивающих прием сигналов НКА с учетом расположения навигационных спутников как составе бортовой АП СРНС, так и в составе наземной ЛККС. Это позволяет значительно снизить погрешности измерения навигационных параметров, в том числе в условиях сильного влияния подстилающей поверхности и окружающих предметов, а также в присутствии посторонних сигналов в полосе частот СРНС.

Разработан алгоритм работы наземной и бортовой аппаратуры потребителей СРНС с использованием корреляционной обработки информации, поступающей от первичных навигационных датчиков, обеспечивающий снижение влияния воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки ВС и проведено полунатурное и математическое моделирование его работы. Схема алгоритма пространственно-временной селекции приведена на рисунке 7.

Проведено математическое моделирование использования предложенного алгоритма адаптивной пространственно-временной обработки навигационной информации для снижения погрешностей измерения радионавигационных параметров, вызванных влиянием элементов конструкции ВС в бортовой АП СРНС, и влиянием подстилающей поверхности и местных предметов в наземной ЛККС.

Результаты расчета уровней защиты (приведены на рисунке 8) и доступности навигационного обеспечения (результаты приведены в таблице 1) категоризированной посадки ВС по СРНС с использованием алгоритма обработки навигационной информации, предложенного в разделе 3, как в АП СРНС на борту ВС, так и в аэродромной ЛККС, показали снижение уровней погрешности измерения дифференциальных поправок и псевдодальностей в условиях влияния элементов конструкции ВС, подстилающей поверхности и местных предметов, а также в условиях внешних воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки воздушных судов.

На основании результатов, полученных в разделе 3, можно сделать следующие выводы:

1. Применение предложенного алгоритма в бортовой АП СРНС и аэродромной ЛККС позволяет обеспечить ее функционирование в условиях воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки ВС и снизить погрешности измерения навигационных параметров, что приводит к повышению точности, доступности и непрерывности навигационного обеспечения посадки ВС по СРНС.

2. При помощи предложенного алгоритма прием каждого НКА производится в соответствии с его пространственным положением относительно ВС или ЛККС что позволяет снизить погрешности измерения навигационных параметров при полете на малых высотах, в частности, при заходе ВС на посадку.

3. Применение предложенного алгоритма в бортовой АП СРНС и аэродромной ЛККС позволяет снизить погрешности измерений псевдодальности, обусловленные влиянием

подстилающей поверхности и элементов конструкции воздушного судна, что позволяет повысить точностные характеристики бортовой АП СРНС как в автономном, так и в дифференциальном режиме навигации в зоне аэродрома при заходе на посадку.

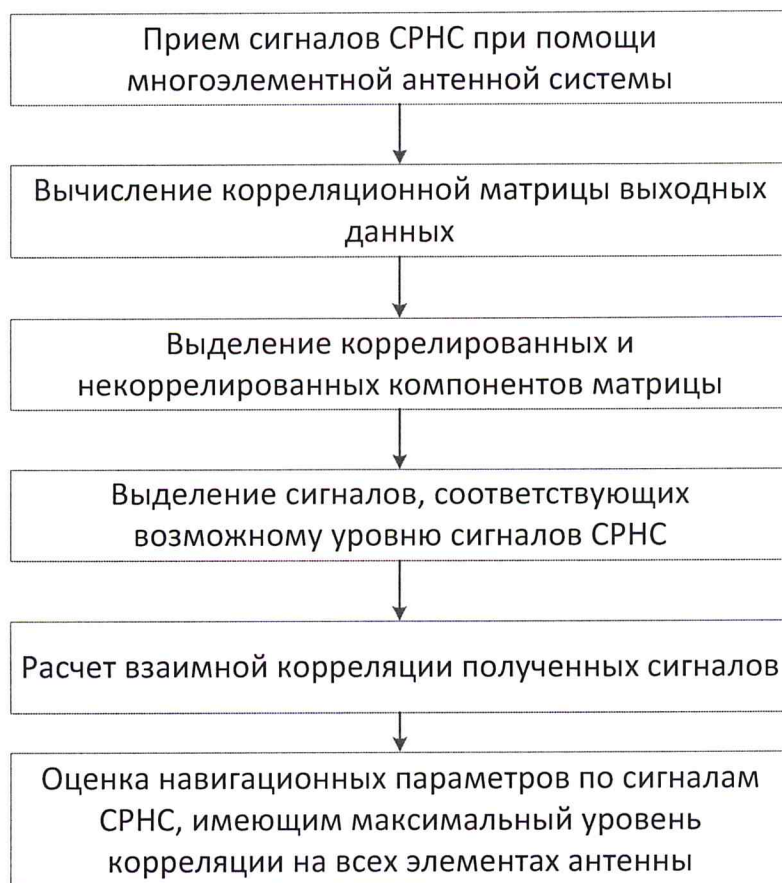


Рисунок 7 – Структурная схема алгоритма пространственно-временной селекции

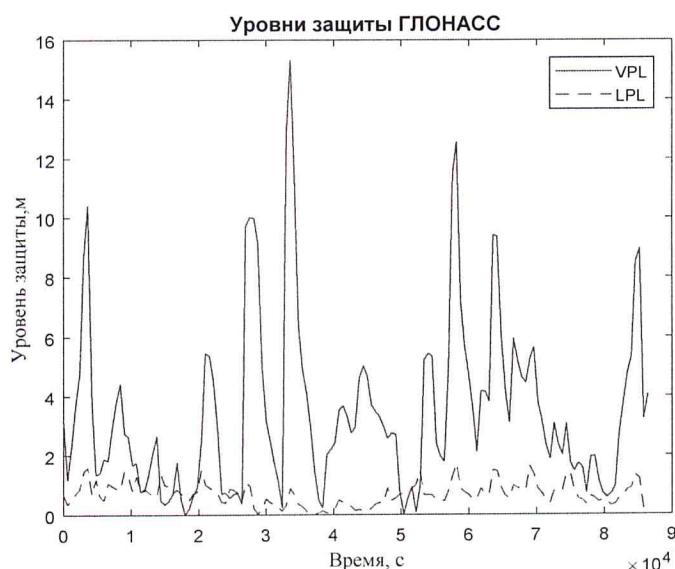


Рисунок 8 - Уровни защиты по вертикали (VPL) и горизонтали (HPL) при работе по ГЛОНАСС с применением предложенного алгоритма обработки информации в условиях воздействия постороннего сигнала

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решается научная задача совершенствования навигационного обеспечения категорированной посадки воздушных судов по сигналам СРНС в условиях различных внешних воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки воздушных судов, имеющая существенное значение для теории и практики разработки и эксплуатации навигационных систем воздушных судов.

Получены следующие новые научные результаты:

1. Разработан адаптивный алгоритм работы наземной и бортовой аппаратуры потребителей СРНС с использованием корреляционной обработки информации, поступающей от первичных навигационных датчиков, обеспечивающий снижение влияния воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки воздушных судов. Его использование позволит обеспечить достаточную точность, доступность, непрерывность и целостность навигационного обеспечения для решения задач категорированной посадки воздушных судов по сигналам СРНС в условиях воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки воздушных судов.

2. Предложена усовершенствованная методика оценки точности и доступности навигационного обеспечения при категорированной посадке с использованием СРНС, позволяющая расчетным путем оценить характеристики навигационного обеспечения с учетом географического расположения аэродрома и ожидаемых внешних воздействий.

3. Показано существенное снижение характеристик навигационного обеспечения как в результате внешних воздействий, так за счет влияния местных предметов и элементов конструкции ВС. Показано повышение характеристик навигационного обеспечения при применении предложенных в работе алгоритмов обработки навигационной информации, приведенных в разделах 2 и 3, как в условиях внешних воздействий, так и в условиях сильного влияния местных предметов и элементов конструкции ВС. Также результатами математического моделирования показано повышение характеристик навигационного обеспечения во всех случаях при работе по двум СРНС совместно.

4. Выявлено, что оценка и передача на борт ВС информации об измеренных ЛККС параметрах ионосферы позволяет произвести в бортовой АП СРНС коррекцию навигационных параметров, измеренных по навигационным сигналам во всех диапазонах частот СРНС, что обеспечивает повышение доступности навигационного обеспечения ВС при заходе на посадку.

5. Показано, что разработанный алгоритм адаптивной фильтрации при измерении навигационных параметров и дифференциальной коррекции СРНС, базирующийся на принципах оптимальной линейной фильтрации, обеспечивает устойчивое определение дифференциальных поправок и параметров ионосферы в ЛККС в условиях, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки воздушных судов, а также позволит снизить погрешности определения дифференциальных поправок, а, следовательно, повысить точность, доступность, и целостность навигационного обеспечения ВС при заходе на посадку с использованием СРНС.

Применение полученных в диссертации научных результатов при разработке и эксплуатации авиационной АП СРНС и ЛККС позволяют:

- повысить точность, доступность, непрерывность и целостность навигационного обеспечения категорированной посадки по сигналам спутниковых радионавигационных систем в условиях внешних воздействий, приводящих к нарушению работоспособности системы посадки воздушных судов;

- произвести оценку точности и доступности навигационного обеспечения расчетным путем с учетом расположения аэродрома и модели внешних воздействий при планировании размещения локальных контрольно-корректирующих станций на аэродромах в части оценки потенциальной эффективности их работы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций на соискание ученой степени:

1. Криницкий Г. В. Оценка влияния ограничения угла возвышения НКА на точность и доступность определения местоположения ВС по сигналам ГЛОНАСС на конечном участке захода на посадку / Г. В. Криницкий, А. В. Зими́на, А. С. Зимин. // Научный вестник МГТУ ГА. – М., – 2015. – № 221. – С. 59 – 67.

2. Криницкий Г. В. Метод повышения эксплуатационных характеристик ГНСС с использованием наземных функциональных дополнений путем учета свойств распространения радиосигналов в атмосфере / Г. В. Криницкий, М. Д. Леонова, Е. Н. Юрасова // Научный вестник МГТУ ГА. – М., – 2016. – № 5. – С. 179 – 185.

3. Криницкий Г. В. Методы снижения влияния многолучевости на качество спутниковой навигации для обеспечения точного захода на посадку / Г. В. Криницкий, М. Д. Леонова, Е. Н. Юрасова // Научный вестник МГТУ ГА. – М., – 2015. – № 222. – С. 98 – 102.

4. Криницкий Г. В. Алгоритм обработки сигналов в аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем, предназначенной для обеспечения точного захода на посадку в условиях воздействия радиопомех // Научный вестник МГТУ ГА. – М., – 2017. – № 5. – С. 43 – 49.

В других изданиях:

1. Криницкий Г. В. Алгоритм поиска сигналов ГНСС ГЛОНАСС пониженного уровня // Новости навигации. – М., – 2017, – № 1. – С. 9 – 15.

2. Криницкий Г. В. Алгоритм сопровождения навигационных сигналов при определении дифференциальных поправок с использованием фильтра Калмана // Новости навигации. – М., – 2017, – № 4. – С. 25 – 29.

Опубликованные тезисы докладов по теме диссертации:

1. Криницкий Г. В. Исследование возможности аппаратной реализации цифровой обработки сигналов космических радионавигационных систем с применением КИХ-фильтров на ПЛИС / Г. В. Криницкий, А. С. Зимин, М. Р. Степанова // Конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики – 2010». Аннотации работ. – СПб., – 2010. – С. 78.

2. Криницкий Г. В. Применение многоантенных систем для повышения помехозащищенности систем спутниковой радионавигации на подвижных объектах / Г. В. Криницкий, А. С. Зимин // Конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики – 2011». Аннотации работ. – М., – 2011. – С. 123.

3. Криницкий Г. В. Усовершенствованный алгоритм устранения фазовой неоднозначности при определении пространственной ориентации объекта в среде ГНСС / Г. В. Криницкий, А. С. Зимин // Конференция "Информационные технологии и радиоэлектронные системы". Аннотации работ. – М., – 2014.

4. Krinitsky G. Evaluation of navigation support characteristics of categorized aircraft approach and landing using global navigation satellite systems (GNSS). – Vol. 174 of the Advances in the Astronautical Sciences Series / G. Krinitsky, M. Leonova, V. Konoplev // Proceedings of the IAA/AAS SCITECH FORUM 2019 on Space Flight Mechanics and Space Structures and Materials 25 – 27 June 2019, Moscow, Russia. Pub. 2021, 1046 p. – P. 187 – 202.

Список докладов по теме диссертации:

1. Конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики-2010», МАИ, г. Москва, 2010 г. Исследование возможности аппаратной реализации цифровой обработки сигналов космических радионавигационных систем с применением КИХ-фильтров на ПЛИС.

2. Конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики-2011», МАИ, г. Москва, 2011 г. Применение многоантенных систем для

повышения помехозащищенности систем спутниковой радионавигации на подвижных объектах.

3. Конференция «Информационные технологии и радиоэлектронные системы», МАИ, г. Москва, 2015 г. Усовершенствованный алгоритм устранения фазовой неоднозначности при определении пространственной ориентации объекта в среде ГНСС.

4. 11-ая Международная научно-техническая конференция Межгосударственного совета «Радионавигация», Российского общественного института навигации (РОИН) и Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) «Тенденции и гармонизация развития радионавигационного обеспечения» г. Москва, 2016 г. Алгоритм поиска сигналов ГНСС ГЛОНАСС пониженного уровня.

5. The IAA/AAS SCITECH FORUM 2019 on Space Flight Mechanics and Space Structures and Materials, Moscow, Russia, 2019. Evaluation of navigation support characteristics of categorized aircraft approach and landing using global navigation satellite systems (GNSS).

Подписано в печать **.**.****

Печать трафаретная

Формат 60x84/16

1,17 уч. –изд.л.

1 печ.л.

Заказ №****

Тираж *** экз.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА),
125993, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20.*