

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

SIBIRIAN  
FEDERAL  
UNIVERSITY



СИБИРСКИЙ  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

Институт инженерной физики и радиоэлектроники  
660074, Россия, Красноярск, ул. Ак. Киренского, 28  
телефон / факс (391) 291-22-72  
<http://efir.institute.sfu-kras.ru>, e-mail: [Ysalomatov@sfu-kras.ru](mailto:Ysalomatov@sfu-kras.ru)

03.12.2019 № 040801/924

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Учёному секретарю  
диссертационного совета Д 212.268.04

д.т.н. профессору

Акулиничеву Ю.П.

ФГБОУ «Томский государственный  
университет систем управления и  
радиоэлектроники»

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Уважаемый Юрий Павлович!

Направляем **Отзыв** ведущей организации («ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет») на диссертационную работу **Шаврина Вячеслава Владимировича** «Синтез и исследование алгоритмов фильтрации радионавигационных параметров сигналов СРНС в системе навигации космического аппарата на геостационарной и высокоэллиптической орбитах».

Приложение: 1. Отзыв

2 экз. на 6 л.

Зам. директора по науке ИИФ и РЭ

Ю.П. Саломатов



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный  
университет»

Р.А Барышев

«03» декабря 2019 г

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Шаврина Вячеслава Владимировича

«Синтез и исследование алгоритмов фильтрации радионавигационных параметров сигналов СРНС в системе навигации космического аппарата на геостационарной и высокоэллиптической орбитах»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 05.12.14 – «Радиолокация и радионавигация»

### Актуальность работы

Координатно-временное обеспечение космических аппаратов (КА) при освоении околоземного космического пространства является актуальной задачей. Традиционно она решается с помощью наземных комплексов контроля и управления. В связи с активным ростом производительности вычислительной аппаратуры и уменьшением её массогабаритных характеристик, она может быть решена при помощи создания систем автономной навигации (САН) КА, которая не использует сигналы наземных комплексов контроля и управления. Одним из каналов обеспечения навигационно-временной информацией САН КА в околоземном пространстве являются сигналы спутниковых радионавигационных систем (СРНС). Работоспособность САН, а также точность координатно-временного обеспечения зависят от возможностей системы навигационной аппаратуры формировать оценки радионавигационных параметров (РНП), которые должны обеспечивать требуемую точность решения навигационной задачи в САН.

При функционировании КА на геостационарных и геосинхронных орбитах (ГСО), а также на высокоэллиптических орбитах (ВЭО) различных типов, оценки РНП могут обладать большими погрешностями или вовсе отсутствовать в связи с низкими мощностями принимаемых сигналов СРНС. В этой связи, задача синтеза и исследования алгоритмов формирования РНП в

системе автономной навигации КА, решению которой посвящена диссертационная работа, является актуальной.

### **Общая характеристика работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 111 источников и одного приложения.

**Во введение** автором обоснована актуальность диссертации, сформулированы цель работы, выделены задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели, сформулированы научная новизна и практическая значимость результатов работы, приведены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведён обзор литературы по теме оценивания РНП в навигационной аппаратуре, выделены основные способы организации схем слежения за радионавигационными параметрами. Приведены результаты анализа условий функционирования приёмников САН для КА на геостационарной и высокоэллиптической орбитах. Рассмотрены ключевые моменты байесовской теории оценивания. Сделан вывод о необходимости использования схемы слежения, содержащие динамические следящие фильтры (фильтры Калмана), в терминах диссертационной работы – схемы слежения «первого» и «второго» типа.

**Вторая глава** диссертации посвящена описанию и исследованию схем слежения за РНП «первого» и «второго» типа в когерентном режиме работы. Автором представлены результаты статистического моделирования работы исследуемых схем слежения при навигации КА на геостационарной орбите. Получены зависимости среднеквадратичных погрешностей (СКП) оценок РНП, а также характеристика «вероятность захвата на сопровождение». Синтезирована адаптивная по неизвестным начальным параметрам схема слежения «второго типа». Исследовано влияние применения адаптивного подхода на величину «вероятности захвата на сопровождение» для схемы слежения «второго типа». Показано, что применение адаптации в определённых условиях позволяет повысить вероятность вхождения в режим слежения до 30%, или, при фиксированной вероятности захвата на сопровождение, расширить область применения схемы слежения «второго типа» по параметру отношение сигнал/шум на 2-3 дБ.

В этой же главе приведены результаты моделирования работы схем слежения двух типов в условиях снижения отношения сигнал/шум. Данные результаты демонстрируют преимущество использования схемы «второго типа» перед схемой слежения «первого типа» по параметру отношение сигнал/шум до 1.5 дБ.

В главе также представлены результаты моделирования работы схемы слежения «второго типа» при обработке новых навигационных сигналов СРНС ГЛОНАСС с модуляцией ВОС(1,1). Автор диссертации отмечает, что основной проблемой на пути применения схем слежения с нелинейным фильтром Калмана для оценки РНП сигналов с модуляцией ВОС(m, n) является вопрос

разрешения неоднозначности временной корреляционной функции.

**В третьей главе** выполнен синтез схемы слежения «второго типа» для некогерентного режима слежения за РНП. Представлены результаты статистического моделирования – среднеквадратичные погрешности оценки РНП и характеристики «вероятность захвата на сопровождение» в зависимости от параметра отношение сигнал/шум. Приведено сравнение результатов моделирования для схем слежения двух типов. Исследования выполнены для достаточно широкого диапазона неопределённости по частоте (до 330 Гц). Показано значимое различие характеристик следящих схем "первого" и "второго" типов в некогерентном режиме, что, видимо, обусловлено малым временем накопления - до 5 мс.

В главе исследовано влияние дополнительных частотно-разнесённых каналов корреляторов – «быстрого» и «медленного» на характеристики работы схем слежения двух типов. При этом получен вывод о том, что применение дополнительных частотно-разнесённых каналов корреляционной обработки не оказывает влияния на точностные характеристики контура слежения.

По итогам исследований алгоритмов оценки РНП в некогерентном режиме следящей системы (СС) в составе САН, автор формулирует выводы и рекомендации по выбору параметров системы.

**В четвёртой главе** изложена методика проведения экспериментальных исследований и представлены результаты четырёх типов натуральных испытаний. Они выполнены с использованием реальных (записанных) выборок сигналов СРНС GPS от наземного приемника с всенаправленной антенной. Воспроизведение свойств сигналов для случая САН КА реализовано с помощью измерительного генератора сигналов СРНС. Записанные данные в режиме постобработки с помощью программы, реализующей разработанные в работе алгоритмы фильтрации, подтвердили результаты математического моделирования, приведенные во второй и третьей главах диссертационной работы.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

В приложении представлены акты внедрения.

**Научная новизна проведённых исследований** заключается в следующем.

1. Выполнен синтез алгоритмов формирования совместных квазиоптимальных оценок РНП в режиме слежения при обработке сигналов с выходов корреляторов в бортовом приёмнике КА при полёте на ГСО и ВЭО. Задача решена на основе современных подходов марковской теории нелинейной фильтрации.

2. Предложен способ адаптации к неизвестным начальным параметрам сигнала для схемы слежения «второго типа», функционирующей в когерентном режиме. Показано, что адаптация по фазе обеспечивает увеличение характеристики «вероятность захвата на сопровождение» до 20% дБ при величинах отношение сигнал/шум от 23 дБ-Гц и выше.

3. Предложен алгоритм оценки РНП для СС «второго типа», функционирующей в некогерентном режиме, с применением методов марковской теории нелинейной фильтрации. Получены зависимости среднеквадратических погрешностей оценок частоты и задержки в зависимости от отношения сигнал/шум. Показано, что предложенная некогерентная схема слежения осуществляет захват сигнала на сопровождение при отношении сигнал/шум 21 дБ-Гц с вероятностью 0.8 при ошибках в начальной оценке частоты до 330 Гц.

4. Исследованы статистические характеристики оценок РНП и вероятностные характеристики событий «захват на сопровождение» и «срыв слежения» для алгоритмов оценки РНП при различных способах построения СС. Выполнено сравнение полученных характеристик оценок с соответствующими параметрами в следящей системе, состоящей из типовых дискриминаторов РНП и линейного петлевого фильтр Калмана. Показано, что в условиях снижения отношения сигнал/ шум ниже 21 дБ-Гц и времени накопления 10 мс схема слежения «второго типа» демонстрирует меньшие СКП оценок РНП по сравнению со схемой слежения, содержащей дискриминаторы.

**Практическая значимость результатов** диссертационной работы заключается в разработке и исследовании алгоритмов формирования оценок РНП в следящем режиме при функционировании НАП в условиях низкой энергетики, характерной для полета КА на ГСО и ВЭО. Результаты работы представляют интерес при проектировании навигационных приёмников, использующих сигналы с BPSK и (или) BOC модуляцией, как для космического, так и для наземного потребителя.

**Достоверность основных выводов и результатов диссертации** подтверждается согласованностью результатов статистического моделирования на ЭВМ с данными экспериментальных исследований.

#### **Замечания по диссертации и автореферату**

По диссертации и автореферату имеются следующие замечания:

1. Сравнение исследований статистических характеристик оценок РНП в нелинейном следящем фильтре, реализующем квазиоптимальный алгоритм сигма-точечного фильтра Калмана с использованием в качестве входных данных сигналов с выходов коррелятора, с данными работы Перова А.И. (Перов А.И. Сравнительный анализ двух алгоритмов фильтрации параметров навигационного радиосигнала малой мощности / Радионавигационные технологии – М.: Радиотехника, 2019. №8. С. 9 – 19) выполнено автором недостаточно убедительно.

Не совсем ясно, что обуславливает преимущество, разработанного алгоритма для малых значений уровня С/Ш по сравнению с алгоритмом, предполагающим наличие в контуре слежения сосредоточенных оптимальных дискриминаторов с последующей оптимальной фильтрацией сигнала дискриминаторов в петлевом линейном фильтре.

2. Во второй главе работы, для сравнения качества работы схем слежения различных архитектур СС, автор использует такую величину как «предельная точность фильтрации». Однако уже в третьей главе эта характеристика отсутствует. Возникает вопрос о качестве полученных точностных характеристик.
3. В четвёртой главе представлены результаты обработки экспериментальных данных. При этом сравнение результатов работы СС носит только качественный характер. В результате остается открытым вопрос о правомерности выводов, сделанных по результатам экспериментов.
4. Приведённые результаты экспериментальных исследований относятся к обработке сигналов СРНС наземного потребителя. Работа же автора направлена на улучшение характеристик бортовой навигационной аппаратуры. Необходимы разъяснения о возможности применения выводов, полученных в результате экспериментальных исследований, для использования в САН.

Отмеченные замечания имеют локальный характер и не снижают общую положительную оценку выполненных автором диссертации исследований.

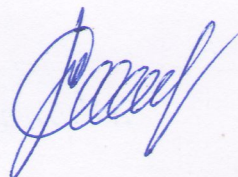
#### **Заключение**

Диссертация «Синтез и исследование алгоритмов фильтрации радионавигационных параметров сигналов СРНС в системе навигации космического аппарата на геостационарной и высокоэллиптической орбитах» является цельной законченной научно-квалификационной работой, посвященной актуальной проблеме дальнейшего повышения точности систем автономной навигации КА. Используемые автором современные методы разработки и исследования алгоритмов оценки РНП в приемниках ГНСС, полученные им результаты и их анализ подтверждают высокий уровень работы в целом. Опубликованные работы содержат основные результаты, представленные в диссертации, и подтверждают их использование в СЧ ОКР, выполненных с участием автора для предприятий космической отрасли.

Работа удовлетворяет п.9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Шаврин Вячеслав Владимирович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсуждён и одобрен на заседании семинара кафедры радиотехники ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» 3 декабря 2019г., Протокол № 1.

Заведующий кафедрой радиотехники  
к.т.н., профессор



Саломатов Ю. П.

Федеральное государственное  
автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Сибирский федеральный  
университет», СФУ

Почтовый адрес

E-mail

Телефон

Должность

степень

Ф И О

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

[ysalomatov@sfu-kras.ru](mailto:ysalomatov@sfu-kras.ru)

+7 (391) 291-22-78

Заведующий кафедрой радиотехники

к.т.н

Саломатов Юрий Петрович

Профессор кафедры радиотехники, д.т.н.

Кашкин В.Б.

Федеральное государственное  
автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Сибирский федеральный  
университет», СФУ



Почтовый адрес

E-mail

Телефон

Должность

степень

Ф И О

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

[rtcvbk@rambler.ru](mailto:rtcvbk@rambler.ru)

+7 (391) 292-74-64

Профессор кафедры радиотехники,

д.т.н.

Кашкин Валентин Борисович