

Ломаев Юрий Сергеевич

**Алгоритмы повышения точности системы навигации и
поддержания её целостности**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(космические и информационные технологии)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2020

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск.

Научный
руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор **Попов Евгений Александрович**

Официальные
оппоненты:

Малинкин Виталий Борисович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
университет телекоммуникаций и информатики»,
г. Новосибирск, профессор кафедры
многоканальной связи и оптических систем

Сташков Дмитрий Викторович
кандидат технических наук
АО «СИНЕТИК», г. Новосибирск,
ведущий специалист по АСУ ТП горнорудной
промышленности

Ведущая
организация:

АО «Научно-производственная корпорация
«Системы прецизионного приборостроения»,
г. Москва

Защита состоится 10 апреля 2020 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.249.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» по адресу: 660037, г. Красноярск, проспект имени газеты Красноярский рабочий, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» и на сайте: <https://www.sibsau.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Панфилов
Илья Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Освоение северных регионов страны является важнейшим вектором экономического развития. В связи с потребностью повышения точности местоопределения объектов в северных широтах возникает необходимость в совершенствовании спутниковых радионавигационных систем.

Подход, заключающийся в расширении и поддержании состава орбитальной группировки в целях улучшения глобальных характеристик системы, подробно описан в трудах «Global Positioning System» (G.T. French), «Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration» (M.S. Grewal, L.R. Weill, A.P. Andrews), «Сетевые спутниковые радионавигационные системы» (В.С. Шебшаевич). Суть подхода заключается в расположении новых КА (космических аппаратов) в непосредственной близости от устаревающих спутников с целью расширения функциональных возможностей (в основном, в части обработки радионавигационной информации), защиты от возможных сбоев в их работе. Но в перспективе это приведёт к геометрическим ограничениям группировки.

Существует идея создания высокоорбитального сегмента (КА на высокоэллиптической орбите, далее по тексту – космического потребителя) в глобальной навигационной системе и его использование в качестве дополнительной региональной навигационной спутниковой системы для обеспечения стабильной навигации в приполярных и заполярных районах. При практической реализации данной идеи возникают вопросы по следующим аспектам:

- возможность обработки информации аппаратурой радионавигации КА высокоэллиптического орбитального сегмента по сигналам со спутниковых навигационных систем;
- организация надежного совместимого взаимодействия высокоэллиптического орбитального сегмента с существующими глобальными навигационными системами.

Вопрос обработки информации, полученной со спутниковых навигационных систем, освещается в трудах «Определение движения по результатам измерений» (П.Е. Эльясберг), «Основы статистической обработки траекторных измерений» (Б.Ф. Жданюк), «ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования» (А.И. Петров, В.Н. Харисов). При этом применение описываемых в трудах алгоритмов обработки информации рассматривалось для случаев взаимодействия навигационных КА на близких орбитах. Распространение описываемых

алгоритмов для информационного взаимодействия удалённых друг от друга КА на различных орбитах требует проверки и последующего применения описываемых алгоритмов или их доработки.

Целью работы является повышение точности и поддержание целостности навигации потребителя в рамках существующих глобальных спутниковых систем на основе алгоритмической обработки информации, поступающей от навигационных КА в аппаратуру радионавигации космического потребителя на высокоэллиптической орбите.

Для достижения цели необходимо выполнить **задачи**:

1. Разработать модель взаимодействия подсистем навигационных КА и космического потребителя на высокоэллиптической орбите для определения параметров движения космического потребителя, введённого для наращивания орбитальной группировки.

2. Разработать и реализовать адаптивную процедуру для оптимизации параметров коэффициентов усиления при различных углах полураствора приёмных антенн космического потребителя в реальном времени, способствующую увеличению количества радиовидимых навигационных КА для достижения целостности навигации космического потребителя.

3. Разработать алгоритмы обеспечения устойчивой идентификации компонент наложенного сигнала в приёмной аппаратуре космического потребителя на основе использования методов численного дифференцирования и кластерного анализа и нахождения оценок радионавигационных параметров разделённых компонент методами оптимизации.

4. Показать работоспособность разработанной модели, реализовать алгоритмы на отработочном образце для проведения проверок информационно-логического взаимодействия КА при сокращении времени на разработку и тестирование бортового программного обеспечения в условиях ограниченного вычислительного ресурса, закладываемого в бортовые системы космического потребителя, до эксплуатации на космических орбитах.

5. Исследовать влияние предложенных алгоритмов на значения погрешности определения параметров движения космического потребителя.

Объект и предмет исследования. В качестве объекта исследования выступают спутниковые радионавигационные системы космических комплексов. Предметом исследования является процесс

алгоритмического и информационно-логического взаимодействия между КА.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались следующие методы исследования: системный анализ, вычислительная математика, теория оптимизации, системотехника, теория оптимальной фильтрации, теория системного программирования.

Научная новизна. Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Впервые разработана модель взаимодействия подсистем навигационных КА на средних круговых орбитах и КА на высокоэллиптической орбите, демонстрирующая повышение показателей точности определения параметров движения космического потребителя.

2. Разработана новая адаптивная процедура для оптимизации параметров коэффициентов усиления при различных углах полураствора приёмных антенн космического потребителя в реальном времени, способствующая увеличению количества радиовидимых навигационных КА для достижения целостности навигации космического потребителя.

3. Впервые разработаны алгоритмы обеспечения устойчивой идентификации компонент наложенного сигнала в приёмной аппаратуре космического потребителя на основе методов численного дифференцирования, кластерного анализа и оптимизации радионавигационных параметров идентифицируемых компонент, позволяющие определять оценки радионавигационных параметров эффективнее при сравнении с используемыми методами по среднеквадратическому критерию качества идентификации.

4. Показана работоспособность разработанной модели, предлагаемые алгоритмы впервые реализованы на отработочном образце для проверки алгоритмического, информационно-логического взаимодействия бортовой аппаратуры подсистем и бортового вычислительного комплекса космического потребителя, что позволило увеличить объём проверок информационно-логического взаимодействия и сократить время на разработку и тестирование бортового программного обеспечения перед эксплуатацией на космических орбитах.

Теоретическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в разработке, исследовании и реализации алгоритмов обработки информации (автоматизированной идентификации компонент наложенного сигнала в приёмном устройстве

космического потребителя, нахождении оценок параметров аппроксимационной функции), разработки модели взаимодействия подсистем навигационных КА и космического потребителя на высокоэллиптической орбите.

Решение задачи идентификации компонент сигнала заключалось в исследовании и совместной реализации численного дифференцирования на основании аппроксимационной теоремы Вейерштрасса и методов кластерного анализа с целью уточнения количества компонент. При проведении фильтрации в рамках обработки информации было предложено использовать модификацию фильтров нижних (верхних) частот, основанную на применении евклидовой метрики для определения полосы пропускания частот, что может представлять теоретический интерес для исследователей, занимающихся обработкой информации спутниковых радионавигационных систем.

Практическая значимость. Практическая ценность результатов исследований заключается в возможности использования результатов работы при дальнейших исследованиях и разработке высокоточных навигационных космических комплексов для повышения точности определения параметров движения потребителей, обеспечения надёжности и устойчивого функционирования КА при выполнении целевых задач, увеличения объема проверок при сокращении времени на разработку бортового программного обеспечения в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Результаты диссертационного исследования используются при анализе условий распространения сигналов до космических потребителей от навигационных КА (ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, Compass) и доступности их измерений.

Реализация результатов работы. Исследования, проводимые в рамках выполнения диссертационной работы, были поддержаны Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «У.М.Н.И.К.», 2015-2017 гг.

Алгоритмы и подходы были использованы при выполнении НИР «Исследование алгоритмов обработки спектроскопических данных» (договор №6663ГУ2015).

Основные защищаемые положения. На защиту выносятся теоретические и прикладные аспекты прецизионного определения параметров движения космического потребителя, а также обеспечения устойчивого выполнения алгоритмов в бортовой аппаратуре подсистем КА:

1. Разработанная модель взаимодействия подсистем навигационных КА на средних круговых орбитах и КА на высокоэллиптической орбите демонстрирует повышение показателей точности определения параметров движения космического потребителя.

2. Разработанная процедура для оптимизации параметров коэффициентов усиления при различных углах полураствора приёмных антенн космического потребителя в реальном времени способствует увеличению количества радиовидимых навигационных КА для достижения целостности навигации космического потребителя.

3. Разработанные алгоритмы обеспечения устойчивой идентификации компонент наложенного сигнала в приёмной аппаратуре космического потребителя на основе методов численного дифференцирования, кластерного анализа, оптимизации радионавигационных параметров идентифицируемых компонент позволяют определять оценки радионавигационных параметров эффективнее при сравнении с используемыми методами по среднеквадратическому критерию качества идентификации.

4. Использование модели и отработочного образца позволяет выполнить проверки алгоритмического, информационно-логического взаимодействия бортовой аппаратуры подсистем и бортового вычислительного комплекса космического потребителя в условиях ограничения бортового вычислительного ресурса и сократить время на разработку и тестирование бортового программного обеспечения перед эксплуатацией на космических орбитах.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 8 работ, из которых 3 – в изданиях Перечня ВАК, 2 – в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus. Зарегистрировано 3 программных системы в Роспатенте.

Апробация работы. Основные научные результаты были представлены на следующих конференциях:

- международной научно-технической конференции "Computer Modeling 2015" (Санкт-Петербург);
- XX, XXI, XXII международной научно-практической конференции «Решетневские чтения» (Красноярск, 2016, 2017, 2018);
- IV научно-технической конференции молодых специалистов АО «ИСС», (Железногорск, 2017);
- XXI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «РКК «Энергия» (Королев, 2017);

- IV всероссийской научно-технической конференции "Системы связи и радионавигации", АО «НПП «Радиосвязь», (Красноярск, 2017);
- VIII научно-технической конференции ученых и специалистов центра управления полетами, «ЦНИИмаш» (Королев, 2018);
- X и XI общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос», БГТУ «Военмех», (Санкт-Петербург, 2018, 2019);
- международном семинаре «Передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации» the Workshop «Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering» - "MIP: Engineering - 2019".

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемых источников и приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит актуальность темы диссертационной работы, состояние исследуемых вопросов, сформулированную цель и задачи работы, объект, предмет и методы диссертационного исследования, основные защищаемые положения. Рассматриваются вопросы научной новизны, теоретической и практической значимости проведённых исследований.

В **первой главе** содержится краткий экскурс в теорию навигационных спутниковых систем и аналитический обзор состояния глобальных навигационных спутниковых систем на настоящий момент, описываются основные применяемые методы обработки данных, получаемых от навигационных КА, а также приводится оценка вариантов развития и совершенствования алгоритмов обработки спутниковой информации. Кратко приводится теория определения диаграмм направленности приёмных антенных систем и взаимодействия «навигационные КА - потребители» в целом. Выполняется постановка основной навигационной задачи КА, которая заключается в нахождении для потребителя радионавигационных (доплеровское смещение частоты, задержка и фаза сигнала при его распространении от навигационных КА до потребителя) и навигационных (геометрическая дальность и радиальная скорость между потребителем и навигационными КА с учётом расхождения их бортовых шкал времени) параметров. В рамках решения поставленной навигационной задачи производится уточнение параметров движения потребителя на основании измерений дальности и радиальной скорости с помощью метода наименьших квадратов и

фильтрации Калмана, определение радионавигационных параметров на основании методов обработки информации, поступающей от навигационных КА к потребителю.

В рамках построения модели системы определения параметров движения космического потребителя рассчитывается геометрический фактор (ГФ), являющийся фактором влияния на точность решения, формируемый созвездием КА и вычисляемый по формулам:

$$h_X^j = \frac{X - X_{HKA,j}}{D_{geom,j}}, h_Y^j = \frac{Y - Y_{HKA,j}}{D_{geom,j}}, h_Z^j = \frac{Z - Z_{HKA,j}}{D_{geom,j}},$$

$$H_{cos} = \begin{pmatrix} h_X^1 & h_Y^1 & h_Z^1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_X^M & h_Y^M & h_Z^M & 1 \end{pmatrix}, \quad K_\Gamma = \sqrt{\text{tr}(H_{cos}^T H_{cos})^{-1}}, \quad (1)$$

где h_X^j, h_Y^j, h_Z^j – направляющие косинусы вектора из потребителя в j -ый КА относительно осей ОХ, ОУ, ОZ инерциальной экваториальной геоцентрической системы координат (ИЭГСК); H_{cos} – матрица направляющих косинусов по всем измерениям; K_Γ – ГФ, причём для достижения большей точности выполняется условие $K_\Gamma \rightarrow \min$; X, Y, Z – координаты потребителя в ИЭГСК; $X_{HKA,j}, Y_{HKA,j}, Z_{HKA,j}$ – координаты j -го навигационного КА в ИЭГСК; $D_{geom,j}$ – геометрическая дальность между потребителем и j -м КА.

Во **второй главе** приводятся алгоритмы обработки данных, полученных космическим потребителем от навигационных КА.

Для решения задачи навигационных определений КА принимаемая информация приводятся к такой структуре, при которой возможно достаточно точно оценивать радионавигационные параметры (доплеровское смещение частоты, задержку, фазу сигнала). Вследствие этого для эффективной обработки данных в приёмнике космического потребителя необходимо выполнение следующих требований:

- реализация алгоритмов устойчивого распространения информации от навигационных КА до космического потребителя;
- организация эффективного алгоритмического разделения наложенных сигналов в приёмнике космического потребителя.

Для реализации алгоритмов устойчивого распространения информации от навигационных КА до космического потребителя применяются методы фильтрации частотных сигналов. В качестве алгоритмов применяются как стандартные фильтры (Баттерворта, Чебышева, Кауэра), так и модифицированный алгоритм фильтрации нижних частот (ФНЧ), основанный на прямом и обратном преобразованиях Фурье с введением евклидовой метрики для определения полосы пропускания и дальнейшим расчётом расстояния d_{mid} между двумя соседними точками p^{i-1} и p^i (i – номер точки). Далее проверяются условия для фильтрации нижних (верхних) частот:

$$\begin{cases} \text{если } d(p^i, p^{i+1}) - d_{mid} < (>) 0, \text{ то } d(p^i, p^{i+1}) \in w_{cutoff} \\ \text{иначе } d(p^i, p^{i+1}) \in w_{bandwidth} \end{cases}, \quad (2) \Gamma$$

где $w_{cutoff(bandwidth)}$ – полосы среза и пропускания, соответственно.

Разделение наложенных сигналов в приёмнике космического потребителя реализуется за счёт частотного разделения сигналов, передаваемых от различных навигационных КА. Реальные сигналы имеют частично перекрывающиеся спектры. Для эффективного разделения аддитивного сигнала на отдельные компоненты предлагается комплексное использование методов численного дифференцирования, кластерного анализа и последующее нахождение оценок радионавигационных параметров разделённых компонент методами оптимизации. При этом для сравнения рассматриваются такие ранее разработанные методы устранения перекрытия спектров, как Narrow Correlator, Strobe Correlator. В основе численного дифференцирования лежит аппроксимация сигнальной функции, от которой рассчитывается производная, интерполяционным многочленом. Далее производится вычисление первых и высших производных относительной мощности P_A по отношению к частоте сигнала F . При высоком порядке дифференцирования для выделения компонент необходимо выполнение условий:

$$\begin{cases} f^{(2k-1)}(F) = \frac{d^{2k-1}P_A}{dF^{2k-1}} = 0 \\ f^{(2k)}(F) = \frac{d^{2k}P_A}{dF^{2k}} > (<) 0 \end{cases}, \text{ для } k \geq 2 \quad (3)$$

Несколько экстремальных точек, удовлетворяющих условиям (3), могут идентифицировать одну компоненту. С целью автоматизации процесса определения количества компонент в спектре сигнала используется

метод кластерного анализа – последовательный эвристический алгоритм k -эталонов, относящийся к простому быстродействующему алгоритму классификации для выработки первых представлений о структуре данных в признаковом пространстве. Для нахождения параметров аппроксимационной функции используются методы параметрической оптимизации. Качество идентификации (аппроксимации сигнала суммой найденных компонент) оценивается на основе среднеквадратического критерия качества Q_F (отклонение полученных при аппроксимации функциями значений от исходных значений сигнала).

Третья глава диссертационной работы посвящена вопросу поддержания выполняемых навигационными КА задач функционирования. Предлагаются подходы для отработки логики функционирования подсистем КА, обеспечивающие варианты проверок алгоритмического, информационно-логического взаимодействия как в рамках бортовой аппаратуры и бортового вычислительного комплекса навигационных КА, так и для организации межспутниковой связи, посредством которой возможно внесение поправок для уточнения параметров движения потребителя и других КА. В качестве основного средства отработки программной логики функционирования КА рассматривается бортовое программное обеспечение, обеспечивающее взаимодействие вычислительного комплекса и аппаратур КА (в том числе аппаратуры радионавигации, в которой исполняются алгоритмы обработки информации), а также КА между собой (посредством межспутниковой связи с квити́рованием навигационной информации). Для обеспечения выполнения закладываемых алгоритмов обработки информации, имитации доступных бортовых вычислительных ресурсов возникает задача разработки вспомогательных средств предварительной отработки программной логики бортового программного обеспечения, а также парирования нештатных ситуаций, возникновение которых возможно при информационных взаимодействиях как между аппаратами, так и отдельными КА. Варианты разрабатываемых вспомогательных средств для выполняемой отработки бортового программного обеспечения приведены в главе 5.

Четвёртая глава работы посвящена моделированию взаимодействия подсистем навигационных КА и космического потребителя на высокоэллиптической орбите для определения параметров движения космического потребителя с оптимизацией требуемых коэффициентов усиления при различных углах полуа́псуры приёмных антенн космического потребителя в реальном времени,

исследованием зависимости радиовидимости навигационных КА до и после оптимизации коэффициентов усиления антенных систем потребителя, применяемых алгоритмов идентификации компонент в принимаемых космическим потребителем сигналах (алгоритмы приведены в главах 1 и 2).

Моделируемая система имеет вид: космический потребитель на высокоэллиптической орбите – навигационные КА – центр обработки данных – наземные потребители. Рассматривается движение космического потребителя по таким типам высокоэллиптических орбит (ВЭО), как QZSS и Tundra с начальными параметрами орбит, приведёнными в таблице 1.

Таблица 1. Начальные параметры орбит космического потребителя

Орбита	H_{π} , км	H_a , км	e	i , °	w , °	T_{op} , с
QZSS	32750	38820	0,072	64,8	270	86160
Тундра	21660	49910	0,335	64,8	270	86160

В таблице 1 приняты следующие обозначения: H_{π} – высота перигея орбиты; H_a – высота апогея орбиты; e – эксцентриситет орбиты; i – наклонение орбиты; w – аргумент широты перигея орбиты; T_{op} – драконический период обращения.

Для оптимизации требуемых коэффициентов усиления антенн космического потребителя в реальном времени производится моделирование бюджета и взаимодействия навигационных КА и космического потребителя с учетом их взаимного движения, построение плотности и функции распределения величины «сигнал/шум» на интервалах полураствора приёмных антенн с учётом взвешенного процента от числа геометрически доступных измерений.

Фильтрация и идентификация компонент сигналов навигационных КА в приёмной аппаратуре космического потребителя производилось по алгоритму, описанному в главе 2. Выбранный интерполяционный многочлен (при орбите QZSS) имеет вид:

$$\Phi(t, f_{oonj}, \varphi_j) = \sum_{j=1}^n \hat{A}_j \cdot \sin(\hat{b}_j t + \hat{c}_j), \quad (4)$$

где $\hat{A}_j$ – оценка амплитуды A с учётом характеристики модулирующей функции сигнала, содержащей компонент задержки принятия сигнала

потребителем τ_j , $\hat{b}_j$ – оценка составляющей $f_{доп\ j}$, $\hat{c}_j$ – оценка фазы сигнала φ_j , j – компонента сигнала, $j = 1..n$.

Для идентификации сигнальных линий рассматриваются производные 5-го и 6-го порядков (формула (3)). Для нахождения искомых оценок параметров $\hat{A}_j, \hat{b}_j, \hat{c}_j$ рассматривается комбинированное использование методов имитации отжига и симплексного поиска с заданием начальных значений $\hat{A}_0, \hat{b}_0, \hat{c}_0$.

В таблице 2 содержатся данные зависимости значения критерия качества Q_F при движении космического потребителя по орбите QZSS от выбора пороговой величины d_0 последовательного эвристического алгоритма k -эталонов.

Таблица 2. Зависимость критерия качества Q_F от значений d_0

d_0 (пороговое значение)	Количество классов	Значение критерия качества Q_F
(0.301 – 0.302]	13	0.0082
(0.302 – 0.304]	12	0.0081
(0.304 – 0.405]	11	0.0067
(0.405 – 0.500]	10	0.0082
(0.500 – 0.501]	9	0.0083
(0.501 – 0.604]	8	0.0111

Наименьшее значение Q_F достигается при $d_0 \in (0.304; 0.405]$ при аппроксимации исходной сигнальной функции 11-ю синусоидальными функциями. На рисунке 1 проиллюстрирована аппроксимация наложенного спектра сигнала компонентами при разложении на различное количество составляющих с оптимизированными оценками параметров $\hat{A}_j, \hat{b}_j, \hat{c}_j$ (красная линия – аппроксимирующая функция, синяя – исходные данные).

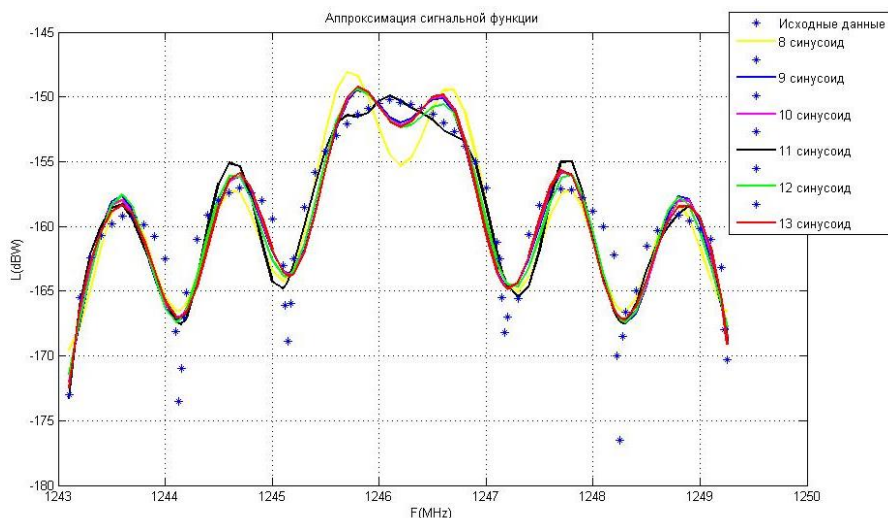


Рисунок 1. Разложение частотного сигнала на компоненты

В таблице 3 приведены результаты сравнения разработанного алгоритма с используемыми алгоритмами Narrow и Strobe Correlators.

Таблица 3. Сравнение результатов работы алгоритмов идентификации компонент сигналов

Метод разделения аддитивного сигнала	Значение критерия качества Q_F
Разработанный метод идентификации компонент	0.0067
Strobe Correlator	0.0102
Narrow Correlator	0.0094

Разработанный метод идентификации сигнальных компонент демонстрирует лучшую эффективность (меньшее значение критерия качества Q_F) разделения рассматриваемого наложенного сигнала.

Результаты влияния выбранных алгоритмов на характеристики ГФ и количества радиовидимых навигационных КА приводятся в таблице 4.

Таблица 4. Влияние выбранных алгоритмов на точностные характеристики

КА на ВЭО	Вид ДН	Filter	Average GF	Min÷Max visible NSC number	Average visible NSC number
QZSS/ Tundra	Optimal gain	Ellipt	5.65(+) /19.49	4÷14/1÷18	10.04(+) /7.08
		Butter	5.70/ 19.53(-)	4÷14/1÷18	9.93/ 7.05(-)
		Cheb	5.87(-) /19.52	3÷14/1÷18	9.72(-) /7.06
		Mod LPF	5.65(+) / 19.43(+)	4÷14/1÷18	10.04(+) / 7.15(+)
		No filt	5.68/19.51	4÷14/1÷18	10.01/7.07
	Non-optimal gain	Ellipt	5.86(+) /19.64	4÷14/1÷18	9.89/7.04
		Butter	5.90/ 19.70(-)	4÷14/1÷18	9.83/ 6.99(-)
		Cheb	5.93(-) /19.69	3÷14/1÷18	9.69(-) / 6.99(-)
		Mod LPF	5.86(+) / 19.63(+)	4÷14/1÷18	9.91(+) / 7.08(+)
		No filt	5.88/19.67	4÷14/1÷18	9.90/7.02

В таблице 4 использованы обозначения и сокращения: КА на ВЭО – космический потребитель на высокоэллиптической орбите; ДН – диаграмма направленности, Optimal gain и Non-optimal gain - с оптимизацией параметров требуемых коэффициентов усиления приёмных антенн космического потребителя и без оптимизации соответственно; Filter – метод фильтрации, фильтры: Ellipt – Кауэра, Butter – Баттерворта, Cheb – Чебышёва 1 рода, Mod LPF – модифицированная фильтрация нижних частот, No filt – без фильтрации; Average GF – среднее значение ГФ (рассчитываемого по формуле (1)), Min, Max, Average visible NSC number – минимальное, максимальное и среднее количество радиовидимых навигационных КА, лучшие показатели отмечены как (+), худшие показатели – (-). Наилучшие показатели характеристик ГФ и радиовидимости навигационных КА достигаются при использовании модифицированной фильтрации нижних частот. Увеличение среднего количества радиовидимых навигационных КА для космического потребителя на высокоэллиптической орбите до 10.04 (тип орбиты QZSS) и 7.15 (тип орбиты Tundra) способствует поддержанию целостности навигации потребителя, а уменьшение среднего значения ГФ до 5.65 (тип орбиты

QZSS) и 19.43 (тип орбиты Tundra) позволяет повысить точность навигации потребителя. Для получения окончательного решения навигационной задачи параметры движения космического потребителя уточняются с помощью МНК (метода наименьших квадратов), фильтров Калмана. Статистические характеристики погрешностей уточнения параметров движения космического потребителя на номинальных параметрах орбитах типа QZSS и Tundra (из таблицы 1) содержатся в таблице 5. Для лучшей эффективности работы метода выполняется условие: $|\Delta X|, |\Delta Y|, |\Delta Z|, |\Delta V_x|, |\Delta V_y|, |\Delta V_z|, |\Delta dt| \rightarrow \min$.

Таблица 5. Среднее значение погрешности уточнения параметров движения космического потребителя

Учёт РНП	Алг.	Орбита	$ \Delta X $, м	$ \Delta Y $, м	$ \Delta Z $, м	$ \Delta V_x $, мм/сек	$ \Delta V_y $, мм/сек	$ \Delta V_z $, мм/сек	$ \Delta dt $, нс
Да	LS	Q	0.010	0.040	0.690	0.020	0.030	0.200	2.290
		T	0.061	0.031	1.401	0.062	0.093	0.191	4.671
	Kalm	Q	0.010	0.040	0.691	0.020	0.030	0.201	2.291
		T	0.060	0.031	1.401	0.061	0.093	0.191	4.670
Нет	LS	Q	0.015	0.046	0.705	0.026	0.037	0.211	2.305
		T	0.068	0.038	1.421	0.071	0.101	0.209	4.689
	Kalm	Q	0.014	0.046	0.707	0.025	0.037	0.212	2.306
		T	0.068	0.037	1.423	0.070	0.100	0.210	4.689

Используемые в таблице 5 сокращения: РНП – радионавигационные параметры, Алг. – алгоритм уточнения параметров движения космического потребителя, LS – метод наименьших квадратов, Kalm – фильтры Калмана, Q – орбита QZSS, T – орбита Tundra.

Методы уточнения параметров движения космического потребителя демонстрируют одинаковую работоспособность, наименьшая погрешность уточнения параметров достигается при учёте найденных оценок радионавигационных параметров $\hat{A}_j, \hat{b}_j, \hat{c}_j$.

В пятой главе в качестве вспомогательных средств для предварительной отработки алгоритмов и программной логики со стороны разрабатываемого бортового программного обеспечения

предлагается использовать либо модельные (программно-математическую модель), либо приближенные представления (образец для отработочных испытаний) бортовой аппаратуры.

В основе подхода использования модельного представления заложена имитация логики работы аппаратуры в виде программного кода, посредством которого выполняется организация алгоритмов и информационного обмена при взаимодействии с бортовым программным обеспечением с учётом вычислительных ресурсов бортового вычислительного комплекса. При создании программной модели аппаратуры не требуется высокая детализация описания ее внутреннего устройства и логики функционирования, а достаточно имитации тех особенностей аппаратуры, которые важны с точки зрения ее взаимодействия с внешней средой (в том числе проводится проверка алгоритмов обработки данных навигационных КА).

При реализации подхода с использованием приближенной копии аппаратуры создаётся образец для проведения испытаний, являющийся прототипом штатной аппаратуры по функционалу и базовым программно-техническим характеристикам, на котором отрабатываются программно-алгоритмические решения. Такое отработочное изделие дешевле штатной аппаратуры и изготавливается быстрее, в связи с чем существует возможность увеличения объёмов отработок алгоритмов и логики функционирования подсистем КА до завершения изготовления штатного образца и его функционирования на космической орбите.

Использование предлагаемых подходов разработки программного обеспечения систем, включающих прямое взаимодействие с образцом для лабораторно-отработочных испытаний и применение модельного представления, способствует проведению проверок алгоритмического взаимодействия в рамках бортовой аппаратуры и бортового вычислительного комплекса КА и сокращению временных затрат на 5 месяцев при разработке и тестировании бортового программного обеспечения до эксплуатации бортовых систем на космической орбите. Ввиду отработочного проведения проверок производится парирование ошибок в цикле разработки, автономного и системного тестирования бортового программного обеспечения.

В заключении приведены основные результаты и выводы, полученные в результате проведения диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

По результатам выполнения диссертационной работы получены следующие результаты:

1. Разработана модель взаимодействия подсистем навигационных КА и космического потребителя на высокоэллиптической орбите для определения параметров движения космического потребителя, введённого для наращивания орбитальной группировки.

2. Разработана и реализована процедура для оптимизации параметров коэффициентов усиления при различных углах полураствора приёмных антенн космического потребителя в реальном времени, способствующая увеличению количества радиовидимых навигационных КА (до 10.04 при орбите QZSS и 7.15 при орбите Tundra) для достижения целостности навигации космического потребителя.

3. Разработаны алгоритмы обеспечения устойчивой идентификации компонент наложенного сигнала в приёмной аппаратуре космического потребителя на основе использования методов численного дифференцирования и кластерного анализа и нахождения оценок радионавигационных параметров разделённых компонент методами оптимизации. Комбинированное использование методов имитации отжига и симплексного поиска при нахождении оценок радионавигационных параметров разделённых компонент демонстрирует лучшую эффективность (значение критерия качества Q_F составляет 0.0067) при сравнении с такими алгоритмами идентификации компонент сигналов как Strobe Correlator ($Q_F = 0.0102$) и Narrow Correlator ($Q_F = 0.0094$).

4. Показана работоспособность разработанной модели, реализованы алгоритмы на отработочном образце для проведения проверок информационно-логического взаимодействия КА и сокращения времени на 5 месяцев при разработке и тестировании бортового программного обеспечения в условиях ограниченного вычислительного ресурса, закладываемого в бортовые системы космического потребителя, до эксплуатации на космических орбитах.

5. Исследовано влияние предложенных алгоритмов на значения погрешности определения параметров движения космического потребителя. Предлагаемые алгоритмические решения приводят к уменьшению погрешности параметров движения космического потребителя по каждому из направлений – вдоль орбиты $|\Delta X|$ (на 0.005 метров при орбите QZSS, на 0.008 метров при орбите Tundra), по бинормали $|\Delta Y|$ (на 0.006 метров при орбите QZSS, на 0.006 метров при

орбите Tundra), по радиус-вектору $|\Delta Z|$ (на 0.015 метров при орбите QZSS, на 0.020 метров при орбите Tundra), что позволяет повысить точность навигации космического потребителя.

Решение поставленных задач позволило достичь выполнения цели диссертационного исследования.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Ломаев Ю.С. Применение лабораторно-отработочного образца для оптимизации разработки бортового программного обеспечения / Ломаев Ю.С., Иванов И.А. // Журнал «Успехи современной радиоэлектроники» №12. – М.: 2017. – С.146-149.

2. Yu. S. Lomaev. Applying software-mathematical models of onboard equipment to develop onboard software/ Yu. S. Lomaev, I. A. Ivanov, A.V. Tolstykh, E. V. Islent'ev // Siberian Journal of Science and Technology, 2019, Vol. 20, No. 2, P. 166-173.

3. Lomaev Yu. S. Applied Data Processing for X-ray Diffraction Analysis and Optical Spectroscopy / Lomaev Yu. S. // Университетский научный журнал «Humanities and Science University Journal». – 2016. – №17. – С. 35 – 52.

Публикации в изданиях, входящих в систему цитирования

Scopus:

4. Yu. S. Lomaev. Improving the navigation spacecraft radio visibility with signal processing algorithms usage/ Yu. S. Lomaev, E. A. Popov, I. A. Ivanov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2019, Vol. 537 022048.

5. Yu. Lomaev. Automatic calculation of left ventricular volume in magnetic resonance imaging using an image-based clustering approach / Yu. Lomaev, I. Ivanov, A. Barkovskaya // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2019, Vol. 537 042046.

В других изданиях:

6. Ломаев Ю.С. Automation of physical experiments data/ Ю.С. Ломаев// КОМОД 2015: труды Международной научно-технической конференции. - Санкт-Петербург, 2015. - С.105 - 107.

7. Ломаев Ю.С. Исследование условий радиовидимости навигационных космических аппаратов в зависимости от алгоритмов обработки сигналов / Ломаев Ю.С., Иванов И.А. // Сборник материалов XXI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «РКК «Энергия» – Королёв, 2017 г. – С. 200-201. – 2017.

8. Ломаев Ю.С. Модификация подходов проведения тестирования программного обеспечения при разработке бортового программного обеспечения / Ломаев Ю.С., Толстых А.В., Звонарь В.Д. // Молодёжь. Техника. Космос: труды X Общероссийской молодёжной научно-технической конференции. – СПб.: «Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ» №50», 2018. – С.109-113.

Зарегистрированные программные системы:

1. Программная система автоматизированной обработки спектроскопических данных с использованием методов кластерного анализа и эволюционных алгоритмов нестационарной мультимодальной оптимизации / Ломаев Ю.С., Панфилов И.А., Сопов Е.А. // Свидетельство № 2017662420 о государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ от 07.11.2017.

2. Программная модель командно-телеметрического модуля бортового информационно-навигационного комплекса космического аппарата ГЛОНАСС-К2 / Ломаев Ю.С., Антропов Н.Р., Болсуновский А.В., Иванов И.А., Ислентьев Е.В., Толстых А.В. // Свидетельство №2019664890 о государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ от 15.11.2019.

3. Программный комплекс служебных задач космического аппарата ГЛОНАСС-К2 / Ломаев Ю.С., Антропов Н.Р., Болсуновский А.В., Иванов И.А., Ислентьев Е.В., Толстых А.В. // Свидетельство №2019664739 о государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ от 13.11.2019.