

На правах рукописи

Карауш

Карауш Артем Андреевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ
ОЦЕНИВАНИЯ ТЕКУЩИХ НАВИГАЦИОННЫХ
ПАРАМЕТРОВ СПУТНИКОВ ГНСС ПО ДАННЫМ
БЕЗЗАПРОСНЫХ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Специальность 05.12.14 —
«Радиолокация и радионавигация»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Красноярск — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Сибирский государственный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии»

Научный руководитель: доктор технических наук
Толстиков Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: **Антонович Константин Михайлович**,
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», кафедра физической геодезии и дистанционного зондирования,
профессор-консультант

Марарескул Татьяна Александровна,
кандидат технических наук,
Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва», сектор разработки бортового эфемеридно-временного и навигационного обеспечения системы ГЛОНАСС,
начальник сектора

Ведущая организация: Акционерное Общество «Научно-производственное предприятие “Радиосвязь”»

Защита состоится 14 февраля 2017 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.21 на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660036, г. Красноярск, улица Академгородок 13а, ауд. 1-07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан декабря 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета


Дмитриев Дмитрий Дмитриевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

В настоящее время перед учёными стоит задача повышения точности и надёжности координатно-временных определений на основе применения спутниковой навигационной системы (СНС) ГЛОНАСС. В связи с этим проводится работа по модернизации системы во всех её сегментах. В частности, для эффективного решения поставленной задачи требуется глубокая переработка технологии эфемеридно-временного обеспечения (ЭВО) системы. Одно из направлений модернизации ЭВО связано с переходом основного источника информации о состоянии орбитальной группировки навигационных спутников (НС) на принципиально новые беззапросные технологии траекторных измерений. Центральной задачей эфемеридно-временного обеспечения, которую необходимо решать на основе беззапросных технологий, является определение орбит навигационных спутников, входящих в состав ГЛОНАСС, то есть оценивание их текущих навигационных параметров.

Проблемами определения орбит спутников занимались отечественные учёные: Е. П. Аксенов, Г. Н. Дубошин, П. Е. Эльясберг, В. В. Малышев, В. В. Митрикас, М. Ф. Решетнев, А. К. Гречкосеев, В. А. Бартенев, Б. Ф. Жданюк, Т. В. Бордовицина; а также зарубежные учёные: М. Ash, G. Blewitt, R. Dach, S. Schaer, D. Dong, Y. Bock, T. Herring, R. King, M. Ge, J. Kouba, S. Loyer, F. Mercier, D. Laurichesse, L. Mervart, O. Montenbruck, E. Gill, T. Springer, G. Beutler, G. Xu и другие.

Беззапросные технологии траекторных измерений обладают высокой производительностью, информативностью и потенциально высокой точностью. Однако, применение этих технологий приводит к необходимости решения ряда проблемных задач.

В частности, результаты траекторных измерений оказываются зависимыми от большого числа влияющих факторов, которые необходимо моделировать и прогнозировать. Это обстоятельство приводит к необходимости оценивания текущих значений этих факторов путём решения систем алгебраических уравнений большой размерности, которые в подавляющем числе случаев обладают плохой обусловленностью.

Для восстановления орбит навигационных спутников требуется тщательный учёт действующих на спутник возмущений, в том числе от несферичности гравитационного поля Земли, гравитационных воздействий Луны и Солнца, а также радиационного давления солнечного излучения. Учёт этих возмущений требует привлечения адекватных математических моделей.

Важным элементом задачи восстановления орбит навигационных спутников является применение эффективных численных методов интегрирования уравнений движения спутников, обеспечивающих высокую точность интегрирования при наличии особенностей в правой части уравнений движения НС, порождённых действующими на НС возмущениями.

Решение перечисленных проблемных задач и составляет основное содержание диссертационных исследований.

Преодоление трудностей, порождённых перечисленными проблемными вопросами, позволило создать в ФГУП «СНИИМ» программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий оценивание текущих навигационных параметров спутников ГЛОНАСС и GPS с характеристиками точности, удовлетворяющими требованиям Федеральной целевой программы “Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы”.

Проведённые аналитические исследования позволили выбрать конструктивные параметры алгоритмов, обеспечивающие минимальные уровни погрешностей оценивания и погрешностей прогнозирования текущих навигационных параметров спутников ГНСС, что позволило применять полученные оценки и прогнозы в региональной системе дифференциальной коррекции и мониторинга эфемеридно-временной информации.

Всё это позволяет считать тему диссертационных исследований актуальной, а полученные результаты полезными для практики применения спутниковых навигационных технологий.

Целью является повышение точности оценивания текущих навигационных параметров спутников систем ГНСС по данным беззапросных траекторных измерений в целях контроля навигационного поля ГНСС, а также разработка алгоритмов и соответствующих им программных приложений и методик оценивания и прогнозирования навигационных параметров спутников.

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

1. Анализ методов описания движения космического аппарата ГНСС.
2. Анализ возмущений, действующих на навигационный спутник (НС), и факторов, влияющих на точность траекторных измерений радиотехническими методами.
3. Синтез математических моделей возмущений, действующих на НС, а также математических моделей факторов, влияющих на точность траекторных измерений радиотехническими методами.
4. Синтез алгоритмов оценивания начальных условий движения НС, алгоритмов оценивания орбит НС по данным беззапросных траекторных измерений.
5. Модельные исследования точности оценивания текущих навигационных параметров НС.
6. Разработка методики оценивания текущих навигационных параметров действующей орбитальной группировки НС по данным беззапросных траекторных измерений.

Объектом диссертационных исследований являются орбитальные группировки навигационных спутников ГНСС, математические модели, описывающие движение этих спутников, и математические модели каналов беззапросных траекторных измерений радиотехническими методами.

Предметом диссертационных исследований являются алгоритмы оценивания текущих навигационных параметров спутников ГНСС по данным беззапросных псевдодальномерных кодовых и фазовых измерений.

Научная новизна:

1. Для улучшения обусловленности матрицы системы нормальных уравнений, подлежащей решению относительно начальных условий уравнений движения НС, *впервые* применён метод инструментальной переменной.
2. Проведён сравнительный анализ численных методов интегрирования дифференциальных уравнений движения НС и дифференциальных уравнений в вариациях, применяемых для расчёта изохронных производных, в условиях скачкообразных возмущений в правой части уравнений, связанных с прохождением НС теневого участка орбиты, показал наилучшие оценки точности интегрирования для метода Эверхарта.
3. Разработаны методы и алгоритмы высокоточного оценивания текущих навигационных параметров спутников ГНСС по данным беззапросных кодовых и *фазовых* псевдодальномерных измерений, исследованы метрологические характеристики алгоритмов.
4. Предложен оригинальный алгоритм обнаружения и компенсации потерь фазовых циклов в псевдодальномерных фазовых измерениях, позволивший на 20 % улучшить качество исходных данных для решения задачи оценивания параметров орбитального движения НС.

Теоретическая значимость работы

1. Разработана методика оценивания текущих навигационных параметров НС ГНСС по данным кодовых и фазовых траекторных измерений.
2. На основе исследования алгоритмов оценивания навигационных параметров НС построена математическая модель движения НС, учитывающая различные возмущающие движение факторы, в том числе релятивистской природы.
3. Созданы модели возмущений, действующих на дальномерный сигнал. Получены конструктивные оценки точности для навигационных параметров спутников и для расчёта прогнозов этих параметров.
4. Показана возможность существенно понизить обусловленность системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с помощью метода инструментальной переменной. Применение данного метода может быть распространено на другие области науки и техники, в которых возникает необходимость решения плохо обусловленных СЛАУ.

Практическая значимость работы

Разработанные алгоритмы и программные приложения позволяют получить высокоточные оценки текущих навигационных параметров спутников ГЛОНАСС и GPS по данным беззапросных траекторных измерений. Достоверность и эффективность полученных оценок подтверждается численными экс-

периментами с реальными данными беззапросных траекторных измерений и последующим сравнением с апостериорными эфемеридами. Алгоритмы ориентированы для использования в региональной системе дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) навигационного поля ГЛОНАСС и GPS в условиях применения государственного вторичного эталона времени и частоты ВЭТ 1-19. Применение этих поправок позволяет повысить уровень точности КВО потребителя.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертационном исследовании задач были применены методы математического анализа, вычислительной математики, теории вероятности и математической статистики, теории сигналов, линейной алгебры, методы математического и имитационного моделирования. При экспериментальном исследовании разработанных алгоритмов были применены методы программирования и компьютерного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Применение метода инструментальных переменных в сочетании с масштабированием в задаче оценивания параметров орбитального движения навигационных спутников ГНСС обеспечило повышение точности оценивания указанных параметров по сравнению с оцениванием на основе МНК на 20–30 %.
2. Предложенные математические модели движения спутников ГНСС с параметрическими моделями действующих на спутники возмущений от радиационного давления Солнца обеспечивают высокоточное позиционирование указанных спутников на орбитах с погрешностями, не превышающими единиц сантиметров.
3. Разработанные алгоритмы оценивания текущих навигационных параметров спутников ГНСС по данным беззапросных кодовых и фазовых радиотехнических псевдодальномерных измерений, методики оценивания и соответствующие этим методикам программные приложения, а также результаты исследований метрологических характеристик разработанных алгоритмов показывают уменьшение погрешностей оценивания координат НС до уровней менее 6 см.

Достоверность полученных результатов обеспечена корректным и строгим применением математического аппарата, сравнением моделей влияющих факторов с априорными сведениями о них. Эффективность предложенных алгоритмов оценивания подтверждается результатами сравнения полученных оценок параметров орбитального движения навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS с апостериорными эфемеридами этих спутников, предоставляемых международными службами ГНСС.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» в (г. Новосибирск, ФГБОУ ВПО «СГГА», 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 гг.), на Международной научно-технической конференции «Актуальные про-

блемы электронного приборостроения» (г. Новосибирск, 2012, 2014, 2016 гг.), Международной научно-технической конференции «Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека» (г. Железнодорожск, 2012 г.), Всероссийской конференции «Малые Винеровские Чтения» (г. Иркутск, 2013, 2014, 2015 гг.), Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации» (г. Красноярск, 2014, 2015, 2016 гг.), XLI научно-технической «Конференции молодых учёных и специалистов военных метрологов» (г. Мытищи, 2016 г.), международном научном семинаре «Relativistic Geodesy: Foundations and Applications» (г. Бад Хоннеф, Германия, 2016 г.).

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы:

1. Были использованы в ФГУП «СНИИМ» при выполнении составных частей ОКР «Шкалы» и ОКР «Совмещение» ФЦП «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы».
2. Были внедрены в учебный процесс на кафедре Систем сбора и обработки данных НГТУ (г. Новосибирск).
3. Использовались в рабочем процессе «Центра навигационных и геоинформационных технологий Новосибирской области».

Использование результатов диссертационных исследований подтверждается соответствующими актами внедрения, находящимися в приложении А к диссертации.

В дальнейшем на основе проделанных исследований предполагается разработка комплекса специального программного обеспечения для непрерывного мониторинга навигационных полей спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS, а также новых систем, находящихся в стадии развёртывания: GALILEO и COMPASS.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 23 печатных изданиях, 6 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 7 — в тезисах докладов.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, сформулирована цель, ставятся задачи работы, определены основные научные результаты, их новизна, теоретическая и практическая значимость.

Первая глава посвящена постановке задачи оценивания текущих навигационных параметров спутников ГНСС.

Перечислены требования к алгоритмам оценивания текущих навигационных параметров, выдвигаемые ГСВЧ и региональными системами коррекции и мониторинга:

- Оперативность.

- Независимость.
- Достаточно высокая точность.
- Возможность оценивания шкал времени одновременно с оцениванием орбитальных параметров.
- Возможность совместной обработки как можно большего числа спутниковых систем (как минимум ГЛОНАСС и GPS).

Показано, что существующие пакеты ПО для решения подобных задач, не могут удовлетворить выдвигаемым требованиям.

Формализованная постановка задачи оценивания текущих навигационных параметров (ТНП) навигационных спутников включает в себя следующие разделы:

1. Описание движения НС в инерциальной системе координат (ИСК) с учётом действующих на НС возмущений;
2. Описание исходных данных и уравнения измерений (учёт влияющих факторов);
3. Описание метода оценивания ТНП;
4. Критерии качества оценивания ТНП;
5. Пути повышения точности оценивания.

Движение НС в ИСК в гравитационном поле Земли описывается дифференциальным уравнением

$$\ddot{\mathbf{r}}(t) = -\frac{\mu \cdot M_E}{r^3(t)} \cdot \mathbf{r}(t) + \sum_{i=1}^5 \mathbf{f}_i(t), \quad (1)$$

$$\mathbf{r}(t_0) = \mathbf{r}_0,$$

$$\dot{\mathbf{r}}(t_0) = \dot{\mathbf{r}}_0$$

где

$\mathbf{r}(t) = (x(t), y(t), z(t))^T$ – вектор координат НС в ИСК,

μ – гравитационная постоянная,

M_e – масса Земли,

$r(t) = |\mathbf{r}(t)| = \sqrt{x^2(t) + y^2(t) + z^2(t)}$ – радиус орбиты,

$\mathbf{f}(t) = (f_{xi}(t), f_{yi}(t), f_{zi}(t))$ – вектор действующих на НС возмущений, приведённых к центру масс, в том числе:

$\mathbf{f}_1(t)$ – возмущения от несферичности геопотенциала Земли,

$\mathbf{f}_2(t)$ – возмущения от гравитационного воздействия на НС Луны и Солнца,

$\mathbf{f}_3(t)$ – возмущения от радиационного давления на НС солнечного излучения (РД, РР),

$\mathbf{f}_4(t)$ – возмущения релятивистской природы,

$\mathbf{f}_5(t) = (\xi_x(t), \xi_y(t), \xi_z(t))$ – возмущения случайной природы.

Факторы $\mathbf{f}_1(t)$, $\mathbf{f}_2(t)$, $\mathbf{f}_4(t)$ учитываются априорными моделями с известными параметрами. К сожалению, фактор $\mathbf{f}_3(t)$ не поддаётся такому модели-

рованию, имея в своём составе до 9 параметров, которые необходимо уточнять совместно с начальными условиями движения r_0, \dot{r}_0 . Фактор $f_5(t)$ не моделируется, поскольку имеет случайный характер.

В таблице 1 представлен перечень сил, действующих на НС, с примерными оценками величины воздействия.

Таблица 1 – Примерный порядок сил, действующих на НС

Наименование силы	Действие силы, m/c^2
Центральная сила притяжения Земли	0,56
Гармоника несферичности геопотенциала S_2	5×10^{-5}
Прочие гармоники несферичности геопотенциала	3×10^{-7}
Притяжение Луны	5×10^{-6}
Притяжение Солнца	2×10^{-6}
Приливные деформации геопотенциала	2×10^{-9}
Давление солнечного излучения	1×10^{-7}
Релятивистские эффекты	3×10^{-10}

Как правило, орбиты навигационных спутников уточняются относительно некоторой опорной орбиты, близкой к истинной орбите. Первое приближение начальных условий для интегрирования орбиты получается путём прогноза орбиты от прошлых известных значений. Наличие опорной орбиты и её близость к истинной позволяет более точно линеаризовать уравнения частных производных дальномерных измерений по начальным условиям движения навигационного спутника. На рисунке 1 представлена схема оценивания начальных условий при наличии опорной траектории и дальномерных измерений.

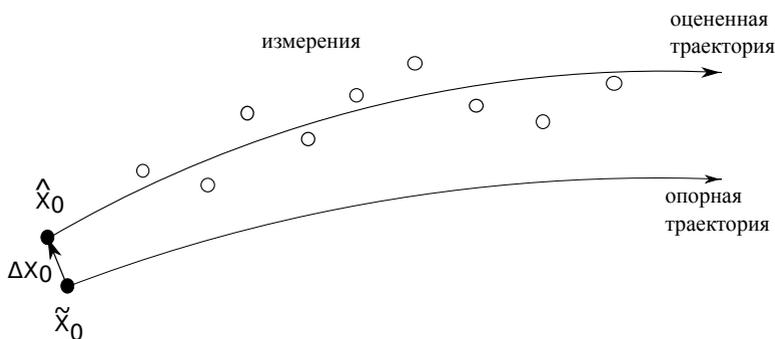


Рисунок 1 – Опорная траектория и оценённая орбита

Сначала необходимо вычислить частные производные дальномерных измерений \mathbf{D} по начальным условиям движения \mathbf{Y}_0 . Они представляют собой произведение частных производных дальномерных измерений по текущим навигационным параметрам и частных производных текущих навигационных параметров по начальным условиям.

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \mathbf{Y}_0} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \mathbf{X}} \cdot \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{Y}_0} \quad (2)$$

Здесь \mathbf{X} — текущие навигационные параметры спутника, $\partial \mathbf{D} / \partial \mathbf{X}$ — частные производные измеренной дальности по текущим навигационным параметрам; $\partial \mathbf{X} / \partial \mathbf{Y}_0$ — переходная матрица;

Затем, используя опорную траекторию, вычисляются невязки дальномерных измерений.

$$\Delta D = D - \rho_c \quad (3)$$

Где ρ_c - геометрическая дальность от приёмника до спутника на опорной орбите, скорректированная поправками на различные влияющие факторы.

Наконец, составляется уравнение, связывающее поправки к начальным условиям с невязками измерений.

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \mathbf{Y}_0} \cdot \Delta \mathbf{Y}_0 = \frac{\Delta \mathbf{D}}{[m \times 1]} + \frac{\Delta \mathbf{q}}{[m \times 1]} \quad (4)$$

$[m \times n]$ $[n \times 1]$

Где m – количество измерений; n – количество параметров.

Решая полученное уравнение относительно \mathbf{Y}_0 тем или иным методом, получаем поправки к начальным условиям, которые позволяют рассчитать новую уточнённую орбиту. Как правило, уточнённая орбита становится новой опорной орбитой, и процесс повторяется до достижения сходимости.

Рассмотрены вопросы вычисления невязок псевдодальномерных измерений ΔD , являющихся сходными данными для решения задач оценивания ТНП навигационных спутников и для решения координатно-временных задач потребителя.

Псевдодальность представляется в виде суммы различных составляющих:

$$D(t) = \rho_a [\mathbf{r}_S(t), \mathbf{r}_R(t)] + \sum_{i=1}^{14} q_i(t), \quad (5)$$

в которых:

$\rho_a(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_R)$ — истинная геометрическая дальность между навигационным спутником и приёмником;

$q_i(t)$ — факторы, влияющие на точность измерений, выраженные в единицах длины;

Факторы $q_i(t)$ компенсируются с помощью математических моделей. Однако, следует отметить, что не все влияющие факторы поддаются априорному моделированию. Это, в частности, касается уходов шкал времени бортовых и наземных часов, влияния тропосферной задержки, фазовой неоднозначности. Такие факторы дополняют вектор оцениваемых параметров.

Далее рассмотрены методы оценивания текущих навигационных параметров. Их можно разделить на 3 группы:

1. Методы оценивания из условий наблюдаемости динамической системы с расширенным вектором состояния;
2. Методы текущего оценивания ТНП на основе рекуррентных процедур калмановского типа;
3. Комбинированные методы.

Анализ литературы показывает, что в задачах высокоточного оценивания ТНП предпочтение отдаётся первой группе методов.

Далее обсуждаются критерии точности оценивания ТНП. За эталонную орбиту принято решение принять финальные продукты службы IGS, как наиболее точные из существующих.

В качестве критериев точности предлагается использовать отклонения от эталонной орбиты следующих видов:

1. 3D - ошибка, ERR_{3D} . Вычисляется как дальность между эталонным положением и оценкой.
2. 1D - ошибка, ERR_{1D} . $ERR_{1D} = \frac{ERR_{3D}}{\sqrt{3}}$
3. Ошибка RAN, в компонентах:
 - R** (англ. Radial - радиальный) - по радиус-вектору;
 - A** (англ. Along - вдоль) - вдоль орбиты, по направлению скорости движения НС;
 - N** (англ. Normal - по нормали) - по бинормали к орбите.
4. Ошибка SISRE (англ. Signal In Space Range Error - погрешность дальности за счёт космического сегмента)

Проведён анализ путей повышения точности оценивания ТНП. В математическом плане задача оценивания вектора начальных условий \mathbf{Y}_0 сводится к решению системы алгебраических уравнений с неточно заданной правой частью

$$U \cdot \Delta \mathbf{Y}_0 = \Delta \mathbf{D} + \Delta \mathbf{q} \quad (6)$$

Существует 3 пути повышения точности решения системы (6):

1. Улучшение свойств матрицы U , а именно уменьшение числа её обусловленности;
2. Уменьшение нормы неизмеримой части $\Delta \mathbf{q}$;
3. Повышение точности модели движения НС, что в свою очередь повышает точность расчёта матрицы U и уменьшает $\Delta \mathbf{q}$.

В целях решения поставленных в диссертационном исследовании задач, было принято решение воспользоваться всеми тремя доступными путями повышения точности.

Для улучшения свойств матрицы U в задаче восстановления орбит был предложен и впервые применён метод инструментальной переменной. Дополнительно применяется масштабирование результирующей системы уравнений.

В целях уменьшения нормы неизмеримой части Δq предлагается использование фазовых псевдодальномерных измерений наряду с широко используемыми кодовыми измерениями. Фазовые измерения имеют характеристики шума на два порядка меньше, чем кодовые.

Особенностью разработанной модели движения НС является учёт большого количества факторов и представление начальных условий движения в виде расширенного вектора состояния, включающего помимо кинематических элементов также параметры модели давления солнечного излучения. Также в целях повышения точности вычисления ТНП проведены исследования различных численных схем интегрирования уравнения движения НС в условиях действия на правую часть скачкообразного возмущения, соответствующего входу и выходу НС в тень Земли.

Вторая глава посвящена исследованию алгоритмов обработки фазовых и кодовых псевдодальномерных измерений.

Рассмотрено влияние факторов различной природы, воздействующих на кодовые и фазовые псевдодальномерные измерения. Для решения задачи высокоточного оценивания ТНП необходимо как можно более точно компенсировать влияние факторов $q_i(t)$ из уравнения (5).

Факторы, влияющие на точность псевдодальномерных измерений:

$q_1(t)$ — фактор, порождённый уходом бортовых часов от момента шкалы времени центрального синхронизатора системы (системного времени);

$q_2(t)$ — фактор, порождённый уходом часов приёмной аппаратуры от системного времени;

$q_3(t)$ — задержка навигационного сигнала в ионосферном слое Земли в единицах длины;

$q_4(t)$ — задержка навигационного сигнала в тропосферном слое Земли в единицах длины;

$q_5(t)$ — погрешности измерений, порождённые релятивистскими эффектами;

$q_6(t)$ — смещение и вариация фазового центра передающей антенны НС относительно центра масс НС;

$q_7(t)$ — смещение и вариация фазового центра приёмной антенны потребителя относительно геометрического центра приёмной антенны;

$q_8(t)$ — смещение антенны потребителя из-за приливных эффектов;

$q_9(t)$ — погрешности, связанные с неточным знанием эфемерид НС, погрешности приведения координат НС в Гринвичскую систему координат, погрешности приведения координат НС к моменту прихода навигационного сигнала на приёмную антенну потребителя;

$q_{10}(t)$ — погрешности от многопутности распространения навигационного сигнала;

- $q_{11}(t)$ — wind-up эффект (действует только на фазовые измерения);
- $q_{12}(t)$ — задержки навигационного сигнала в радиотрактах передающей аппаратуры НС в единицах длины;
- $q_{13}(t)$ — задержки навигационного сигнала в радиотрактах приёмной аппаратуры в единицах длины;
- $q_{14}(t)$ — погрешности случайной природы, включающие шумы измерений.

Далее проведён анализ различных подходов разрешения фазовой неоднозначности. Существующие подходы к разрешению фазовой неоднозначности можно разбить на несколько основных групп:

1. Во вторых разностях измерений с формированием широко- и узкополосной линейной комбинации;
2. Во вторых разностях измерений на исходных частотах;
3. В абсолютных измерениях с формированием широко- и узкополосной линейной комбинации;

При использовании методов первой группы необходимо оценивать существенно меньшее число неизвестных, чем в иных подходах. По этой причине было решено разрабатывать алгоритм разрешения фазовой неоднозначности, основанный на принципах формирования вторых разностей линейных комбинаций.

Разработанная методика разрешения неоднозначности включает несколько шагов:

1. Формирование максимально возможного количества линейно независимых базовых линий между станциями.
2. Сортировка базовых линий по вероятности правильного разрешения.
3. Разрешение неоднозначности в широкополосной комбинации N_{WL} . Этот шаг не требует предварительного решения и точного знания каких-либо параметров и основывается на использовании только исходных измерений.
4. Разрешение неоднозначности ионосферосвободной комбинации N_c . Здесь используются оценки плавающих неоднозначностей, полученные в ходе начального решения.

Далее обсуждается алгоритм обнаружения и исправления потерь фазовых циклов. Для использования фазовых измерений требуются продолжительные сеансы измерений, при которых приёмник удерживает захват навигационного сигнала и непрерывно следит за изменением фазы несущей. Тогда по всему сеансу измерений оценивается только одна величина - начальная неоднозначность фазовых измерений. Однако зачастую приёмник в ходе сеанса измерений теряет сигнал спутника по различным причинам. Тогда при восстановлении слежения за несущей приёмник должен начать отсчёт фазовых циклов заново. Такая ситуация в литературе называется потерей фазовых циклов. В ходе предварительной обработки необходимо обнаружить такие потери и по возможности исправить.

Скачки фазы на частоте L_i представляются в виде:

$$\Delta N_i = N_i' - N_i$$

где N_i' — значение фазовой неоднозначности после потери фазовых циклов на частоте L_i , N_i — значение фазовой неоднозначности до потери фазовых циклов.

Как правило, потеря фазовых циклов на различных частотных каналах происходит независимо и на неодинаковые величины. Таким образом, алгоритм должен обеспечивать независимую идентификацию и исправление фазовых скачков ΔN_1 и ΔN_2 . Для решения этой задачи используется широкополосная и узкополосная комбинации измерений.

На рисунке 2 представлен пример фазового скачка в широкополосной комбинации

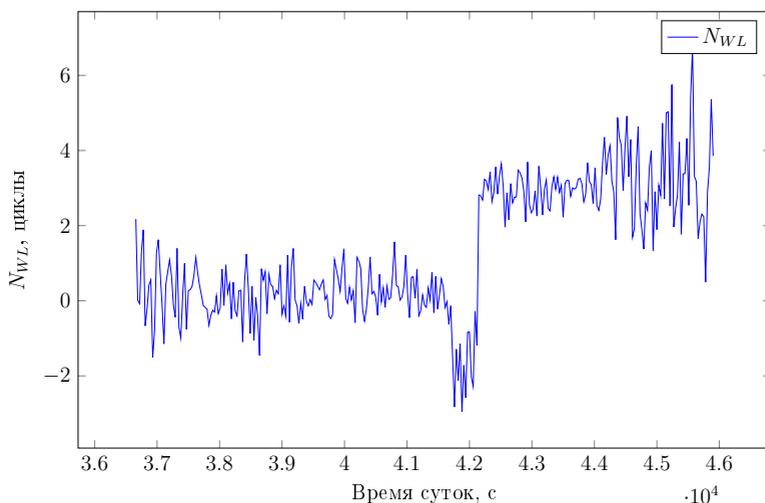


Рисунок 2 — Широкополосная комбинация для спутника GPS6. Два скачка на -2 и $+4$ цикла

Существующие алгоритмы обнаружения потерь фазовых циклов имеют ряд недостатков:

1. Поиск разрывов в широкополосной комбинации начинается от начала трека измерений, где проявления многолучёвости имеют максимальное влияние. Это приводит к ситуации, когда небольшой разрыв игнорируется алгоритмом.
2. Не будут обнаружены скачки в узкополосной комбинации, меньшие чем априорно выбранное порог детектирования узкополосного скачка, даже если характеристики шума фазовых измерений данного приёмника позволяют уверенно обнаруживать такие разрывы.

3. При малых углах места в некоторых приёмниках проявляется эффект, заключающийся в постепенном увеличении величины узкополосной комбинации. Существующими методами проявление этого эффекта может быть ошибочно принято за фазовый скачок или выброс.

В работе разработан усовершенствованный алгоритм обнаружения потерь фазовых. Для борьбы с недостатками существующих методов предлагаются следующие решения:

1. Начинать поиск не от первого измерения, а от измерения, соответствующего моменту наибольшего возвышения спутника над горизонтом. Чаще всего этот момент примерно соответствует середине трека измерений. Преимуществом данного подхода является более точное обнаружение малых разрывов фазы в размере 1–2 циклов в условиях повышенного шума кодовых измерений.
2. Не назначать априорно порог детектирования узкополосного скачка. По аналогии с поиском скачков в широкополосной комбинации, итерационно рассчитывать СКО с среднее значение узкополосной комбинации. Таким образом, порог будет определяться качеством измерений, которые зависят от применяемого оборудования и условий выполнения измерений. А эффекты увеличения значения узкополосной комбинации к краям трека измерений будут компенсироваться расчётным средним значением.

Для оценки эффективности разработанного алгоритма был проведён сравнительный анализ алгоритмов обнаружения потерь фазовых циклов. Для этого были обработаны данные 100 глобально распределённых станций сетей IGS и СДКМ за 1 июля 2016 года. Обработывались данные систем GPS и ГЛОНАСС. Правильность работы алгоритмов контролировалась с помощью анализа невязок фазовых измерений, получаемых после обработки по методу PPP с использованием апостериорных высокоточных эфемерид международных служб. Если по результатам контроля оказывалось, что разрыва на самом деле не было — это засчитывалось как ложное срабатывание алгоритма. Не обнаруженные алгоритмом разрывы также фиксировались в ходе анализа.

В таблице 2 представлены результаты проведённого анализа. Алгоритмы сравнивались по характеристикам ложных срабатываний и не обнаруженных разрывов. Из таблицы видно, что количество измерений и неоднозначностей практически не изменилось. Но существенно уменьшилось число ложных срабатываний по узкополосной комбинации, а также количество не обнаруженных разрывов в широкополосной и узкополосной комбинации.

Таким образом можно считать разработанный алгоритм обнаружения потерь фазовых циклов более эффективным, чем существующие. Его применение в конечном счёте приводит к повышению эффективности решения задачи оценивания ТНП.

Третья глава посвящена исследованию путей повышения эффективности алгоритма оценивания ТНП по данным траекторных измерений.

Таблица 2 — Результаты сравнительного анализа алгоритмов обнаружения потерь фазовых циклов

Параметр	Существующий алгоритм	Разработанный алгоритм	Изменение, %
Всего измерений	4600988	4661560	0,2 %
Всего неоднозначностей	14545	14541	-0,02 %
Ложные срабатывания N_{WL}	218	224	3 %
Ложные срабатывания N_{NL}	212	174	-18 %
Не обнаружено разрывов N_{WL}	89	71	-20 %
Не обнаружено разрывов N_{NL}	43	33	-23 %

В работе *впервые* предложен метод инструментальной переменной для уменьшения числа обусловленности матрицы формируемых в ходе решения уравнений. В основе задачи оценивания текущих навигационных параметров КА ГНСС лежат уравнения беззапросных траекторных измерений. Эти уравнения связывают вектор невязок измеренных кодовых и фазовых псевдодалей $\Delta \mathbf{D}$ с вектором поправок к начальным условиям уравнения движения НС — $\Delta \mathbf{Y}_0$, уравнение (4). Линеаризованное уравнение траекторных измерений по одному НС с одной измерительной станции представляется в виде линейной формы

$$\Delta \mathbf{D} = U \cdot \Delta \mathbf{Y}_0 + \sum_{i=1}^{14} \Delta q_i(t) \quad (7)$$

матрицы $U = \left[\frac{\partial D_j}{\partial Y_0} ; j = 1 \dots m \right]$, размером $m \times n$ и состоящей из функций $\frac{\partial D_j}{\partial Y_0}$, представляющих собой комбинации произведений направляющих косинусов по радиотрассе измерений и производных текущих параметров орбиты по начальным условиям уравнения движения НС \mathbf{Y}_0 . Здесь m — количество измерений, n — размерность вектора \mathbf{Y}_0 , количество начальных условий движения НС. В уравнении (7) $\Delta q_i(t)$ — некомпенсированные факторы, влияющие на точность траекторных измерений.

Традиционно уравнение измерений (7) с n неизвестными параметрами \mathbf{Y}_0 доопределяется до системы m алгебраических уравнений путём фиксации

этого уравнения в моменты времени t_k , $k = 1 \dots k$; $k > 6$ и решается относительно некоторого начального приближения $\tilde{\mathbf{Y}}_0$. Текущие навигационные параметры НС — $(\hat{\mathbf{X}}(t))$ восстанавливаются в результате интегрирования уравнений движения НС, в котором в качестве начальных условий используются полученный вектор оценок $\hat{\mathbf{Y}}_0 = \tilde{\mathbf{Y}}_0 + \Delta \mathbf{Y}_0$.

В математическом плане задача оценивания вектора начальных условий \mathbf{Y}_0 сводится к решению системы алгебраических уравнений

$$U \cdot \Delta \mathbf{Y}_0 = \Delta \mathbf{D} + \Delta \mathbf{q} \quad (8)$$

с неточно заданной правой частью. В уравнении (8) вектор $\Delta \mathbf{q}$ образован факторами $\Delta q_i(t)$, влияющими на точность траекторных измерений.

Система (8), как правило, является переопределённой, поскольку число измерений обычно существенно превышает число неизвестных. Такие системы традиционно решаются методом наименьших квадратов, путём фиксации функций $\frac{\partial D}{\partial \mathbf{Y}_0}$ в моменты имеющихся измерений и применения к обеим частям (8) трансформации Гаусса.

$$U^T U \cdot \Delta \mathbf{Y}_0 = U^T \cdot \Delta \mathbf{D} + U^T \cdot \Delta \mathbf{q} \quad (9)$$

Погрешность решения системы (9) зависит от нормы вектора неизмеримой составляющей в правой части решаемой системы $\|\Delta \mathbf{q}\|$ и, в равной мере, от степени обусловленности матрицы $U^T U$. Справедливо неравенство (10)

$$\|e\| \leq \frac{1}{\lambda_{\min}} \cdot \|\Delta \mathbf{q}\|, \quad (10)$$

в котором λ_{\min} — минимальное собственное значение матрицы $U^T U$.

Необходимо заметить, что способ доопределения уравнения измерений (7) до системы уравнений (8) путём фиксации функций $\frac{\partial D}{\partial \mathbf{Y}_0}$ в равноотстоящие моменты времени является не самым лучшим, поскольку обусловленность матрицы сформированной системы, определяемой числом $\eta = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}$, остаётся плохой.

В работе предлагается доопределить уравнение измерений (7) до системы N линейно независимых уравнений путём интегральных преобразований

$$\int_{t_0}^T \gamma_j(t) \frac{\partial D}{\partial \mathbf{Y}_0}(t) dt \cdot \Delta \mathbf{Y}_0 = \int_{t_0}^T \gamma_j(t) \Delta \mathbf{D}(t) dt + \int_{t_0}^T \gamma_j(t) \sum_{i=1}^{14} q_i(t) dt \quad (11)$$

с помощью системы линейно-независимых функций $\gamma_j(t)$, $j = 1 \dots n$, именуемых инструментальными переменными.

Новые элементы матрицы $U - u_{ij}$ системы (8) после интегральных преобразований (11) можно трактовать, как результат пропуска исходных базисных функций $\phi_i(t)$ через формирующий фильтр, описываемый уравнением

$$u_{ij} = \int_{t_0}^T \gamma_j(t) \cdot \frac{\partial D_i}{\partial \mathbf{Y}_0}(t) dt$$

с весовой функцией $\gamma_j(t)$.

Выбор функций $\gamma_j(t)$ должен быть направлен на формирование матрицы U с наименьшим числом обусловленности η .

Заметим, что использование в качестве инструментальных переменных исходных базисных функций $\gamma_j(t) = \frac{\partial D_j}{\partial \mathbf{Y}_0}(t)$ приводит к методу наименьших квадратов.

Зафиксировав значения $\gamma_j(t_k)$ в моменты измерений t_k , составляем из них матрицу Γ , совпадающую по размерности с матрицей исходной системы U . Далее образуется система нормальных уравнений вида:

$$\Gamma^T U \cdot \Delta \mathbf{Y}_0 = \Gamma^T \cdot \Delta \mathbf{D} + \Gamma^T \cdot \Delta \mathbf{q} \quad (12)$$

Система (12) совпадает по виду и размерности с системой (9), но подбором $\gamma_j(t)$ удаётся добиться существенно меньшего числа обусловленности матрицы $\Gamma^T U$, чем у исходной матрицы $U^T U$.

Были проведены модельные исследования с целью определения наилучшего вида инструментальных переменных. Численные результаты этих исследований представлены далее.

Дополнительные возможности улучшения обусловленности матрицы решаемой системы уравнений (8) появляются за счёт применения масштабирования матрицы уравнений.

Далее обсуждаются методы численного интегрирования уравнений движения НС. Особенностью рассматриваемого уравнения движения является скачкообразное возмущение в правой части, вызванное действием силы солнечного излучения на НС в момент входа и выхода НС в тень Земли. Это обуславливает необходимость проведения исследования существующих методов численного интегрирования для обоснованного выбора наиболее подходящего из них. Наиболее перспективным представляется метод Эверхарта.

Для вычисления матрицы уравнений связи беззапросных измерений с начальными условиями движения НС, необходимо рассчитать переходную матрицу и матрицу чувствительности, которые состоят из частных производных ТНП по начальным условиям движения Y_0 . Для вычисления элементов этих матриц в работе предлагается использовать метод вариаций, суть которого заключается в одновременном интегрировании уравнений движения НС вместе с уравнениями вариаций. Уравнения вариаций представляются в виде

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Phi(t, t_0) &= \frac{\partial f(t, X(t))}{\partial X} \cdot \Phi(t, t_0) \\ \Phi(t_0, t_0) &= E_{6 \times 6} \end{aligned} \quad (13)$$

где

$\Phi(t, t_0)$ — переходная матрица, содержащая частные производные ТНП по начальным условиям движения НС;
 $\frac{\partial f(t, X(t))}{\partial X}$ — частные производные функции правой части уравнения движения НС (1) по ТНП.

Путём численного интегрирования уравнения (13) совместно с уравнением движения НС (1) вычисляется переходная матрица. Матрица чувствительности рассчитывается аналогичным образом.

Четвёртая глава посвящена численным исследованиям методов интегрирования уравнения движения НС, сравнительному численному анализу различных инструментальных переменных, а также натурным исследованиям разработанного алгоритма оценивания ТНП по данным беззапросных траекторных измерений.

Проведён сравнительный анализ различных численных методов интегрирования дифференциальных уравнений. Показано, что оптимальным методом в поставленных условиях является метод Эверхарта. Данный метод даёт наилучший результат, как по точности, так и по эффективности интегрирования. Многошаговые методы Адамса обеспечивают приемлемую точность интегрирования при шаге 100 с, тогда как схема Рунге–Кутты продемонстрировала неприемлемую точность. Результаты численного анализа методов в условиях действия на правую часть уравнения движения НС скачкообразного возмущения представлены в таблице 3.

Таблица 3 — $h = 100$ с, с имитацией ступенчатого воздействия $b \neq 0$

Метод	δ конечное	δ среднее арифм.	δ max	Время, сек	F_Eval
Рунге-Кутты	$3,19 \cdot 10^{-2}$	$7,04 \cdot 10^{-2}$	$8,03 \cdot 10^{-1}$	0,054	4000
Адамса-Штёрмера	$1,01 \cdot 10^{-2}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$	$2,05 \cdot 10^{-2}$	0,052	6006
Эверхарта	$1,39 \cdot 10^{-8}$	$-7,26 \cdot 10^{-10}$	$5,22 \cdot 10^{-8}$	0,492	22051
Адамса-Мультона-Коуэлла	$8,40 \cdot 10^{-3}$	$1,20 \cdot 10^{-3}$	$2,05 \cdot 10^{-2}$	0,276	1991

Проведён сравнительный анализ инструментальных переменных по критерию коэффициента уменьшения числа обусловленности исходной матрицы. Были проведены модельные исследования задачи оценивания начальных условий Y_0 с параметрами орбит НС ГЛОНАСС. Для наглядности и упрощения эксперимента была исключена координата Z. Это соответствует орбите спутника, лежащей в плоскости экватора, и положению станции на экваторе. Полу-

ченная зависимость числа обусловленности матрицы уравнений от вида применяемых инструментальных переменных и масштабирования представлена в таблице 4. Из проведённого анализа следует, что подбором инструментальных переменных $\gamma_j(t)$ в сочетании с масштабированием удаётся существенно улучшить свойства решаемой системы алгебраических уравнений. Для модельной задачи показана возможность уменьшить число обусловленности вплоть до 8 порядков. Использование метода инструментальных переменных повышает эффективность решения задачи оценивания текущих навигационных параметров НС.

Таблица 4 – Результаты расчёта чисел обусловленности для различных инструментальных переменных

N	Инструментальные переменные	η – число обусловленности
1	$\gamma_j(t) = \varphi_j(t)$	$5 \cdot 10^9$
2	$\gamma_j(t)$ - полиномы Чебышёва	$8 \cdot 10^4$
3	$\gamma_j(t) = \varphi_j(t)$ + масштабирование	$9 \cdot 10^4$
4	$\gamma_j(t)$ - гармонические функции	$4 \cdot 10^4$
5	$\gamma_j(t)$ - полиномы Чебышёва + масштабирование	140
6	$\gamma_j(t)$ - гармонические функции + масштабирование	40

Разработанный алгоритм контроля навигационного поля ГНСС является практической реализацией идей, изложенных в первых главах диссертации. Результаты натурных испытаний подтверждают на практике эффективность и точность разработанных моделей учёта факторов, воздействующих на НС и на результаты траекторных измерений, подходов к улучшению свойств матрицы и используемых численных методов интегрирования дифференциальных уравнений. Для проверки эффективности метода инструментальных переменных был проведена серия экспериментов по оцениванию текущих навигационных параметров НС с использованием обозначенного метода и с использованием МНК. На рисунке 3 представлены результаты анализа за 1 июня 2016 года. Видно, что применение инструментальных переменных в сочетании с масштабированием уменьшает среднюю погрешность оценивания ТНП на величину порядка 20 %.

Показана возможность оценивания текущих навигационных параметров спутников ГЛОНАСС и GPS с погрешностью менее 10 см с использованием разработанного алгоритма. Результаты сравнений полученных оценок орбит спутников ГЛОНАСС и GPS с апостериорными орбитами международных

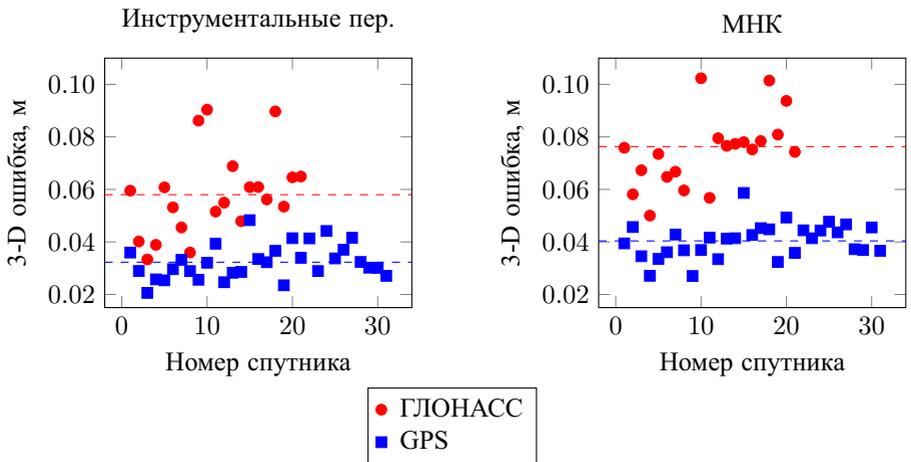


Рисунок 3 — 3-D ошибка оценивания ТНП для спутников GPS и ГЛОНАСС, при использовании инструментальных переменных и МНК

служб в течение месяца представлены на рисунке 4. Таким образом, показано, что разработанный алгоритм позволяет оценивать текущие навигационные параметры спутников ГЛОНАСС и GPS с погрешностями менее 10 см.

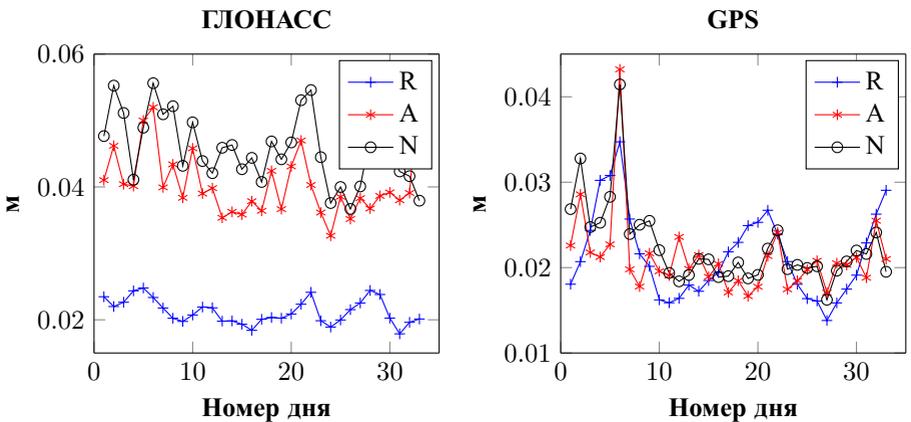


Рисунок 4 — Среднесуточная погрешность по ансамблю спутников ГЛОНАСС в компонентах RAN (данные за май 2016 г)

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. На основе результатов диссертационных исследований решена задача оценивания текущих навигационных параметров спутников ГЛОНАСС и GPS по данным кодовых и фазовых измерений.

2. Высокая точность оценивания навигационных параметров, удовлетворяющая требованиям Федеральной целевой программы “Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 гг.” к точности формирования эфемеридно-временной информации, достигнута за счет применения для формирования системы нормальных уравнений, подлежащей решению относительно начальных условий уравнений движения НС, метода инструментальных переменных.
3. По существу разработанные алгоритмы оценивания текущих навигационных параметров НС представляют собой одну из реализаций орбитального метода космической геодезии. Наряду с навигационными параметрами НС одновременно оцениваются:
 - параметры нестабильности бортовых часов;
 - параметры математических моделей радиационного давления на НС солнечного излучения;
 - координаты беззапросных измерительных станций;
 - зенитные влажные составляющие тропосферных задержек навигационного сигнала;
 - неоднозначности фазовых измерений по каждой радиотрассе;
 - параметры вращения Земли.
4. Повышению точности и достоверности оценок текущих навигационных параметров НС способствует применение алгоритмов предварительной обработки результатов фазовых измерений с целью обнаружения и исправления потерь фазовых циклов, а также обнаружения и исключения выбросов в кодовых и фазовых измерениях.
5. Аналитические исследования точности и устойчивости алгоритмов оценивания строились на основе уравнений динамики алгоритмов, разрешённых относительно погрешностей оценивания. Полученные соотношения позволили решать задачу оптимального выбора конструктивных параметров алгоритмов.
6. Достижению требуемых характеристик точности оценивания способствует применение для оценивания неоднозначностей фазовых измерений вторых разностей широкополосных и узкополосных комбинаций.
7. Важной составляющей разработанных алгоритмов оценивания является применение численной схемы Эверхарта для интегрирования уравнений движения НС и уравнений в вариациях для расчёта производных по начальным условиям. Это обеспечило минимальный уровень погрешностей интегрирования в моменты возникновения скачков в правой части уравнений, связанных с прохождением НС теневого участка орбиты.
8. Разработанные алгоритмы, методики оценивания текущих навигационных параметров КА ГНСС применяются для контроля в мониторинговом режиме параметров навигационного поля ГЛОНАСС и GPS, и предназначены для предоставления результатов контроля пользова-

телям сети активных базовых ГНСС станций Новосибирской области и другим региональным пользователям спутниковых навигационных технологий.

Публикации автора по теме диссертации

1. *Карауш А. А.* Выбор численного метода интегрирования дифференциальных уравнений для задач спутниковых навигационных технологий // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — 2014. — № 31. — С. 174—178.
2. О метрологическом обеспечении сети активных базовых ГНСС-станций Новосибирской области / А. А. Карауш [и др.] // Приборы. — 2014. — 9 (171). — С. 34—38.
3. *Карауш А. А., Ханыкова Е. А., Безродных А. Р.* Частотно-временные определения в спутниковых навигационных технологиях // Успехи современной радиоэлектроники. — 2015. — № 1. — С. 44—47.
4. *Карауш А. А., Толстиков А. С.* Использование метода инструментальных переменных в задаче оценивания текущих навигационных параметров КА // Успехи современной радиоэлектроники. — 2015. — № 1. — С. 33—36.
5. *Карауш А. А., Толстиков А. С., Ханыкова Е. А.* Оценивание частоты пространственно-разнесенных часов на основе фазовых ГНСС измерений // Успехи современной радиоэлектроники. — 2015. — № 10. — С. 82—84.
6. Chronometric measurement of orthometric altitude differences by means of atomic clocks / А. А. Karaush [et al.] // Gravitation and Cosmology. — 2016. — Vol. 22, no. 3. — Pp. 234–244.
7. *Карауш А. А.* Выбор численного метода интегрирования уравнений движения навигационных спутников // Труды XI Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», АПЭП-2012. В 7 т. Т. 2. — НГТУ. Новосибирск, 2012. — С. 120—122.
8. *Карауш А. А., Ханыкова Е. А.* Некоторые подходы к повышению точности эфемеридно-временной информации спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС // Труды Всероссийской молодёжной научно-практической конференции «Малые Винеровские Чтения 2013». — ИрГТУ. Иркутск, 2013. — С. 92—96.
9. Контроль характеристик навигационного поля ГЛОНАСС на метрологических пунктах ГСВЧ / А. А. Карауш [и др.] // Винеровские Чтения 2014: материалы Всерос. молодёжной науч.-практ. конф. с международ. участ. — Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2014. — С. 150—157.

10. *Карауш А. А., Ханыкова Е. А., Безродных А. Р.* Контроль характеристик навигационного поля ГЛОНАСС на метрологических пунктах ГСВЧ // Современные проблемы радиоэлектроники: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с международ. участ. (Красноярск, 6–8 мая, 2014 г.) — Красноярск : Изд-во СФУ, 2014. — С. 259–263.
11. Алгоритмические пути повышения точности и достоверности частотно-временного обеспечения на основе ГНСС-технологий / А. А. Карауш [и др.] // Труды XII Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», АПЭП-2014. В 7 т. Т. 3. — НГТУ. Новосибирск, 2014. — С. 54–59.
12. Algorithmic Ways to Improve the Precise and Reliability of the Time-frequency Definitions for GNSS Technologies / А. А. Karaush [и др.]. — 2014.
13. Предварительная обработка траекторных измерений для оценивания уходов бортовых часов спутников ГЛОНАСС / А. А. Карауш [и др.] // Вино-ровские Чтения 2015: материалы Всерос. молодёжной науч.-практ. конф. — Иркутск : Изд-во ИРНТУ, 2015. — С. 94–98.
14. *Карауш А. А., Толстиков А. С., Ханыкова Е. А.* Оценивание текущих навигационных параметров КА ГНСС с использованием метода инструментальных переменных // Материалы VIII Международного симпозиума «Метрология времени и пространства». — ФГУП «ВНИИФТРИ». Санкт-Петербург, 2016. — С. 160–163.
15. Определение разностей высот по гравитационному смещению частоты мобильного стандарта / А. А. Карауш [и др.] // Материалы VIII Международного симпозиума «Метрология времени и пространства». — ФГУП «ВНИИФТРИ». Санкт-Петербург, 2016. — С. 169–173.
16. Оценивание уходов частоты удаленного квантового стандарта от эталонной частоты по сигналам ГНСС / Е. А. Ханыкова [и др.] // Труды XIII Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», АПЭП-2016 в 12 т. Т. 3., ч. 1. — Новосибирск. — 2016. — С. 59–63.
17. *Карауш А. А., Толстиков А. С.* Оценивание действующих на КА возмущений по данным беззапросных траекторных измерений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. VI Междунар. науч. конгресса, 19–29 апреля 2010 г., Новосибирск. В 2 т. Т. 2. Междунар. науч. конф. "Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии". — СГГА. Новосибирск, 2010. — С. 170–174.

18. *Карауш А. А., Толстиков А. С.* Использование калмановской фильтрации для обработки траекторных измерений КА ГЛОНАСС // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. VII Междунар. науч. конгресса, 19–29 апреля 2011 г., Новосибирск. В 2 т. Т. 2. Междунар. науч. конф. "Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии". — СГГА. Новосибирск, 2011. — С. 200–206.
19. *Карауш А. А., Толстиков А. С., Ханькова Е. А.* Контроль бортовых шкал времени навигационных спутников «Глонасс» в метрологических пунктах государственной службы времени и частоты // Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека. тез. докл. 2-й Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 30-летию запуска на орбиту первого навигац. космич. аппарата «Глонасс» (10–14 октября 2012 г., Железногорск) / под ред. Н. А. Тестоедов. — ОАО «Информационные спутниковые системы»; Сиб. гос. аэрокосмич. Ун-т. Красноярск, 2012. — С. 245–247.
20. *Карауш А. А., Толстиков А. С.* К выбору численных методов интегрирования уравнений движения навигационных спутников // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. VIII Междунар. науч. конгресса, 10–20 апреля 2012 г., Новосибирск. В 2 т. Т. 2. Междунар. науч. конф. "Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии". — СГГА. Новосибирск, 2012. — С. 224–228.
21. *Карауш А. А., Толстиков А. С., Ханькова Е. А.* К выбору численных методов интегрирования уравнений движения навигационных спутников // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. X Междунар. науч. конгресса, 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск. В 2 т. Т. 2. Междунар. науч. конф. "Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии". — СГГА. Новосибирск, 2014. — С. 8–13.
22. *Карауш А. А., Толстиков А. С., Ханькова Е. А.* Методика оценивания характеристик нестабильности бортовых часов навигационных спутников ГЛОНАСС // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгресса, 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск. В 3 т. Т. 3. Междунар. науч. конф. "СибОптика-2015". — СГГА. Новосибирск, 2015. — С. 62–66.
23. О метрологических характеристиках частотно-временной основы ГЛОНАСС / А. А. Карауш [и др.] // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгресса, 18–22 апреля 2016 г., Новосибирск. В 2 т. Т. 1. Междунар. науч. конф. "СибОптика-2016". — СГУГиТ. Новосибирск, 2016. — С. 211–215.

Карауш Артем Андреевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ ТЕКУЩИХ
НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СПУТНИКОВ ГНСС ПО ДАННЫМ
БЕЗЗАПРОСНЫХ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____