

На правах рукописи



Ханыкова Екатерина Андреевна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ
ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕСТАБИЛЬНОСТИ
БОРТОВЫХ ЧАСОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ
ГЛОНАСС ПО ДАННЫМ 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 бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»

Научный руководитель: доктор технических наук
Толстиков Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: **Борисов Борис Дмитриевич**,
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук,
лаборатория лазерных электронных систем, и. о. заведующего кафедрой

Гребенников Андрей Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
Акционерное общество «Научно-производственное предприятие „Радиосвязь“»,
сектор №4101, начальник сектора

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Защита состоится 14 февраля 2017 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.21 на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660036, г. Красноярск, ул. 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 диссертации. Возрастающие требования к качеству ГНСС-услуг, к увеличению точности координатно-временных определений потребителя, выполняемых на основе применения спутниковых навигационных технологий, приводит к необходимости совершенствования эфемеридно-временного обеспечения ГНСС. Одно из направлений модернизации отечественной системы ГЛОНАСС связано с переходом комплекса эфемеридно-временного обеспечения системы на беззапросные технологии траекторных измерений радиотехническими методами по орбитальной группировке навигационных спутников. Эти технологии обладают большей производительностью и информативностью, по сравнению с запросными технологиями, однако их применение затруднено большим количеством внешних факторов влияющих на результаты измерения дальностей от навигационных спутников (НС) до потребителя.

Среди этих факторов ключевыми являются уходы шкал времени бортовых часов НС относительно системной шкалы времени. В целях компенсации уходов бортовых шкал времени в пунктах наземного комплекса управления системы ГЛОНАСС рассчитываются прогнозные значения таких уходов, представляемые в виде частотно-временных поправок (ЧВП). Поправки закладываются на борту каждого НС орбитальной группировки и в последствие передаются потребителю в составе навигационного сообщения.

Построение прогнозных положений бортовых шкал времени относительно Центрального синхронизатора системы осуществляется на основе математических моделей, описывающих характер нестабильности частоты бортовых высокостабильных генераторов. Задача описания и последующего оценивания нестабильности частоты генераторов имеют существенное значение для измерительных систем, имеющих в своем составе высокостабильные источники сигналов времени и частоты. Начиная с 60-х гг. проблеме математической интерпретации нестабильности частоты квантовых стандартов посвящено большое число исследовательских работ Д. Аллана, В. Рэйли, Ж. Рютмана, У.С. Линдси, Дж. А. Барнса.

Значительный вклад в решение задачи оценивания и прогнозирования уходов бортовых часов относительно шкалы Центрального синхронизатора в целях эфемеридно-временного обеспечения системы ГЛОНАСС внесли М.Ф. Решетнев, Б.Ф. Жданюк, А.С. Толстикова, А.К. Гречкосеев, В.М. Владимиров, А. Н. Жуков, Б. Д. Борисов, Б. В. Шебшаевич, С. Б. Пушкин, М. Б. Кауфман.

Несмотря на достигнутые результаты в изучении характера нестабильности часов, построенных на основе квантовых стандартов частоты, остается много проблемных задач в этой области, требующих своего решения. Необходимо выбирать математические модели нестабильности часов, работающих на бортах НС и находящихся под воздействием факторов гравитационной и релятивистской природы; решать задачи оценивания параметров этих математических моделей нестабильности частоты на основе использования результа-

тов беззапросных кодовых и фазовых псевдодальномерных радиотехнических измерений; исследовать аналитическими и экспериментальными методами метрологические характеристики применяемых алгоритмов оценивания; разработать алгоритм и методики компенсации уходов бортовых шкал времени на основе применения адекватных математических моделей нестабильности часов; изучить возможности применения уточненных математических моделей нестабильности квантовых стандартов частоты для традиционных задач частотно-временных определений на основе использования спутниковых навигационных технологий.

Решение перечисленных проблемных задач составляет основное содержание диссертационных исследований автора, что делает тему диссертации актуальной.

Целью диссертационных исследований является повышение точности оценивания параметров нестабильности бортовых часов навигационных спутников ГЛОНАСС по результатам беззапросных кодовых и фазовых траекторных измерений для повышения достоверности результатов контроля качества частотно-временных параметров навигационного поля ГЛОНАСС и для высокоточного прогнозирования уходов бортовых шкал времени, что в конечном счете обеспечит повышение эффективности решения координатно-временных определений ГНСС.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ факторов, порождающих нестабильность частоты бортовых часов навигационных спутников ГНСС, построенных на основе квантовых стандартов частоты.
2. Сделать выбор адекватных математических моделей нестабильности квантовых стандартов частоты, применяемых в качестве часов на бортах навигационных спутников ГНСС.
3. Разработать и исследовать метрологические характеристики алгоритмов идентификации параметров нестабильности бортовых часов по данным беззапросных траекторных кодовых и фазовых измерений.
4. Разработать и исследовать метрологические характеристики алгоритмов прогнозирования уходов бортовых шкал времени.

Научная новизна:

1. Предложены уточненные математические модели нестабильности квантовых стандартов частоты, применяемых на бортах навигационных спутников ГНСС в качестве часов, для которых учтена зависимость частоты указанных стандартов от эффектов гравитационной и релятивистской природы.
2. Впервые разработаны алгоритмы параметрической идентификации бортовых часов с помощью уточненных математических моделей нестабильности и проведены исследования метрологических характеристик этих алгоритмов. Особенностью применения этих алгоритмов

является использование в качестве исходных данных для оценивания параметров результатов псевдодальномерных кодовых и фазовых радиотехнических измерений, выполняемых в условиях применения эталона единиц времени и частоты ВЭТ 1-19.

Теоретическая значимость. Разработанные уточненные математические модели нестабильности, алгоритмы оценивания, методики выполнения измерений и программные приложения этих методик позволили:

— провести исследования погрешностей представления положений бортовых шкал времени навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS с помощью бортовых частотно-временных поправок;

— решать задачи сравнения шкал времени и частот пространственно-разнесенных высокостабильных часов по данным беззапросных кодовых и фазовых траекторных измерений, выполняемых радиотехническими устройствами;

— рассчитать в режиме Ultra-rapid уточненные частотно-временные поправки к бортовым шкалам времени радиовидимой орбитальной группировки спутников ГНСС для системы метрологического обеспечения сети базовых ГНСС станций Новосибирской области.

Практическая значимость результатов диссертационных исследований заключается в следующем.

1. Разработанные алгоритмы оценивания параметров нестабильности частоты бортовых часов используются в штатной работе метрологического пункта Государственной службы времени и частоты (ГСВЧ) ФГУП «СНИИМ» и при выполнении составных частей ОКР «Шкалы» и ОКР «Совмещение» в рамках федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 гг.». Причем использование фазовых псевдодальномерных измерений в качестве исходных данных позволило повысить точность и достоверность результатов сравнения шкал времени пространственно-разнесенных эталонов времени и частоты ГСВЧ и результатов контроля навигационного поля ГЛОНАСС.
2. Полученные оценки погрешностей представления бортовых шкал времени с помощью частотно-временных поправок и уточненные частотно-временные поправки в режиме Ultra-rapid представляются для пользователей сетей базовых ГНСС-станций Новосибирской области, что в конечном счете способствует повышению точности решения задач координатно-временных определений этими потребителями.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач использовались: методы математического анализа, методы математического и имитационного моделирования, теории вероятности и математической статистики, фрагменты специальной теории относительности, теории сигналов, методы линейной алгебры, теории оптимального оценивания параметров сигнала.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Применение уточненных математических моделей нестабильности бортовых часов навигационных спутников ГНСС, учитывающие помимо собственных составляющих долговременной и кратковременной нестабильностей влияние на параметры этих моделей нестабильности эффектов гравитационной и релятивистской природы, обеспечивает уменьшение погрешностей оценивания уходов бортовых шкал времени до 0,1 нс.
2. Использование алгоритмов оценивания параметров математических моделей нестабильностей частоты бортовых и наземных часов, построенных на основе квантовых стандартов частоты, по данным беззапросных кодовых и фазовых траекторных измерений в условиях применения эталона единиц времени и частоты ВЭТ 1-19 с привлечением методики точного позиционирования Precise Point Positioning позволяет уменьшить погрешность оценивания моментов шкал времени до уровня ≈ 1 нс.
3. Разработанные методики оценивания параметров математических моделей нестабильности часов, методики прогнозирования уходов шкал времени бортовых часов НС в режиме Ultra-rapid обеспечивают оперативный расчет корректирующих поправок для применяемых высокостабильных часов и, в конечном счете, повышают точность решения задач координатно-временных определений потребителя.

Достоверность полученных результатов подтверждается результатами теоретических исследований, данными модельных исследований и натуральных измерений. Результаты согласуются с основными теоретическими положениями и находятся в соответствии с результатами, представляемыми центрами обработки ГНСС измерений (ИАЦ ГЛОНАСС, СДКМ, IGS).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации» (ОАО «НПП „Радиосвязь“», СФУ, г. Красноярск, 2014, 2015, 2016 гг.), Международном научном семинаре «Relativistic Geodesy: Foundations and Applications» (Germany, Bad Honnef, 2016 г.), Международном симпозиуме «Метрология времени и пространства» (ФГУП «ВНИИФТРИ», г. Санкт-Петербург, 2016 г.), Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (г. Санкт-Петербург, 2013 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники» (г. Красноярск, СФУ, 2014 г.), Международном военно-техническом форуме «АРМИЯ-2016» (г. Москва, 2016 г.), Международной научно-технической конференции «Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека» (г. Железногорск, ОАО «ИСС им. Решетнева», 2012 г.), Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (г. Новосибирск, ФГУП «СНИИМ», 2012, 2014, 2016 гг.), Всероссийской конференции «Винеровские Чтения» (г. Иркутск, ИрГТУ, 2013, 2014, 2015 гг.), Международном

научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (г. Новосибирск, ФГБОУ ВПО «СГГА», 2012, 2013, 2014, ФГБОУ ВО «СГУГиТ», 2015, 2016 гг.).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 26 печатных изданиях, 6 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 17 — в тезисах докладов.

Содержание работы

Во **введении** дана общая характеристика работы, обоснована актуальность исследований, проведен обзор научной литературы по изучаемой проблеме, сформулированы цель и задачи исследования. Определена научная новизна и практическая значимость представляемой работы. Раскрыто основное содержание диссертационной работы.

Первая глава обсуждается постановка задачи оценивания параметров нестабильности бортовых часов навигационных спутников системы ГЛОНАСС.

Необходимым условием обеспечения требуемой точности решения навигационных задач (оценивание вектора навигационных параметров потребителя ГНСС-услуг $\mathbf{q}_R^T(t) = [\mathbf{u}_R^T(t), \dot{\mathbf{u}}_R^T(t), \Delta T_R(t)]$) является знание с достаточной точностью векторов состояния навигационных спутников $\mathbf{q}_S^T(t)$ и обеспечение малости уровней значений влияющих факторов $\delta(t)$:

$$\mathbf{D}(t) = \mathbf{F}[\mathbf{q}_R^T(t), \mathbf{q}_S^T(t)] + \delta(t). \quad (1)$$

где $\mathbf{D}(t)$ — это массив результатов беззапасных траекторных измерений.

На момент решения навигационных задач потребителя составляющие вектора $\mathbf{q}_S^T(t)$ представляются в виде прогнозных значений, рассчитанных с помощью соответствующих упрощенных моделей и передаваемых в составе навигационного сообщения

$$\vec{q}_S^T(t) = [\vec{\mathbf{u}}_S^T(t), \vec{u}_S^T(t), \vec{\Delta T}_S],$$

где погрешность прогнозирования уходов бортовых шкал времени $e_{TS}(t) = \vec{\Delta T}_S - \Delta T_S$ непосредственно влияет на точность позиционирования потребителя.

Непосредственное участие уходов бортовых часов в измерениях дальностей $D(t)$ и возникновение погрешности в результатах этих измерений проиллюстрировано на рисунке 1.

Исследование точности прогнозных значений $\vec{\Delta T}_S$ навигационных спутников ГЛОНАСС показало, что в ряде случаев имеются существенные значения погрешности e_{TS} представления текущих моментов бортовых шкал времени с помощью аналитических шкал. Лишь в 70 % случаев погрешность e_{TS} не

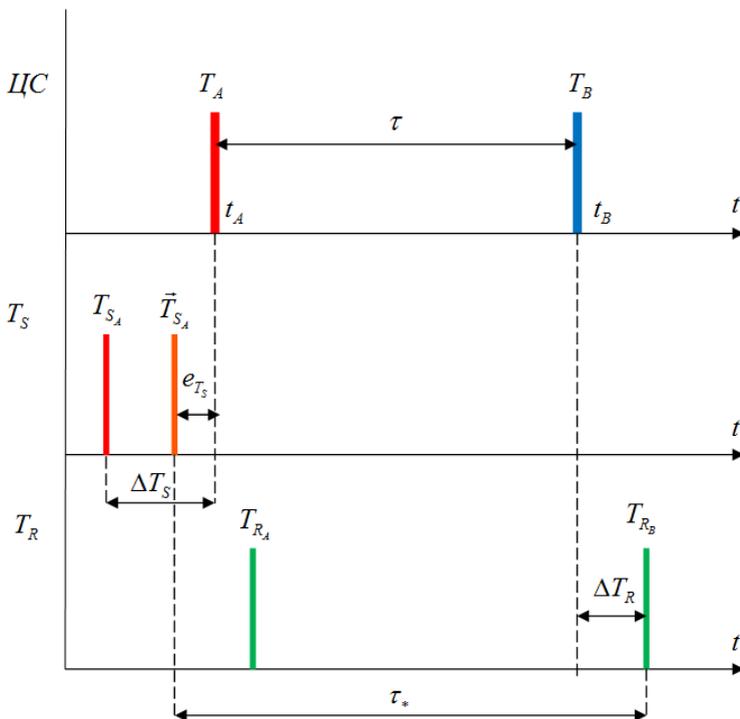


Рисунок 1 — Возникновение погрешности измерения интервала времени прохождения навигационного радиосигнала $e = \tau_* - \tau$ вследствие уходов шкалы бортовых часов и ухода шкалы ресивера

превышает установленные границы значений, предъявляемые для выполнения высокоточных координатно-временных определений (КВО).

Уходы шкал времени рассматриваемых типов часов ΔT_S и ΔT_R (рисунок 1) относительно эталонной шкалы времени Центрального синхронизатора системы $\Delta T_{ЦС}$ связаны с относительным отклонением частоты $\Delta f(t)$:

$$\Delta \dot{T}(t) = \frac{dT(t)}{dt} = \Delta f(t), \Delta T(t_0) = \Delta T_0, \quad (2)$$

где $\Delta f(t) = \frac{\nu(t) - \nu_0}{\nu_0}$ - относительное отклонение частоты стандарта, $\nu(t)$ - действительное значение частоты, ν_0 - эталонное значение частоты. Флуктуации указанной величины $\nu(t)$ в окрестности номинального значения ν_0 являются нестабильностью частоты часов.

Прогнозные шкалы времени бортовых часов строятся на основе частотно-временных поправок и рассчитываются с помощью математических моделей, описывающих нестабильность частоты таких часов.

В общем виде математические модели нестабильности частоты часов представляется как собственная нестабильность частоты, возникающая из-за особенности физической реализации квантовых стандартов частоты (КСЧ), так и нестабильность, порожденную внешними влияющими на работу часов факторами.

Собственная нестабильность частоты подразделяется на долговременную $s(t)$ и кратковременную $w(t)$ составляющие, а к порожденной внешними влияющими факторами - относят изменение частоты из-за проявления эффектов гравитационной и релятивистской природы $F_{rel}(t)$ и из-за флуктуации температуры $F_{tem}(t)$ окружающей КСЧ среды. В данном исследовании параметр $F_{tem}(t)$ не рассматривается. В общем виде относительное изменение частоты из уравнения (2) КСЧ представляется как

$$\Delta f(t) = s(t) + w(t) + F_{rel}(t) \quad (3)$$

В частотной области математическая модель нестабильности частоты представляется в виде спектральной плотности мощности

$$f(\omega) = \sum_{i=-2}^2 \alpha_i \cdot \Omega^i,$$

где составляющая $\alpha_i \cdot \Omega^i$, $i = -2; -1$ - характеризует долговременную составляющую нестабильности, описывающую медленные тенденции к измерению частоты, $\alpha_i \cdot \Omega^i$, $i = 0; 1; 2$ - кратковременная составляющая нестабильности - шум часов.

Для расчета бортовых частотно-временных поправок, передаваемых от НС потребителям в составе навигационного сообщения, используют упрощенный вид математической модели, учитывающий только параметры долговременной нестабильности $s(t)$. Это служит причиной возникновения погрешности при компенсации уходов бортовых часов навигационных спутников ГЛОНАСС.

Проведенный анализ погрешности e_{TS} представления аналитической шкалой времени уходов бортовых часов навигационных спутников обосновывает необходимость в разработке метода и алгоритмов оценивания текущих уходов бортовых шкал времени. Поставленная задача содержит этапы решения:

1. обоснованный выбор математической модели нестабильности частоты бортовых часов и разработку алгоритма идентификации параметров нестабильности этой математической модели;
2. построение и исследование адекватных параметрических моделей нестабильности частоты бортовых часов в целях расчетов прогнозных значений уходов этих часов;

3. разработку метода оценивания текущих значений уходов бортовых шкал времени по данным траекторных измерений;
4. расчет статистических характеристик погрешностей такого оценивания;
5. проведение экспериментальной проверки разработанного метода оценивания параметров нестабильности бортовых часов по данным траекторных измерений и сопоставление полученных результатов с публикуемыми данными отечественных и зарубежных служб;
6. разработка предложений и рекомендаций к применению метода оценивания параметров нестабильности бортовых часов навигационных спутников ГЛОНАСС.

Вторая глава посвящена процедуре идентификации нестабильности часов и прогнозированию уходов этих часов с помощью построенной адекватной математической модели.

Долговременная нестабильность частоты $s(t)$ из уравнения (3) представляется на интервале времени $[t_k, t_{k+1}]$ линейной комбинацией

$$s(t) = \sum_{i=0}^n \phi_i(t) \cdot a_i + F_{rel}(t), \quad (4)$$

где $\phi_i(t)$ – базисные функции, a_i – оцениваемые коэффициенты на интервале времени $[t_k, t_{k+1}]$. При аппроксимации дискретных значений исследуемого процесса $s(t)$ с помощью полиномов Чебышева преобразуют в степенной вид, параметрами которого являются частотно-временные поправки:

$$s(t) = a_{s0} + a_{s1} \cdot (t - t_k) + a_{s2} \cdot (t - t_k)^2 + F_{rel}(t)$$

где a_{s0} – смещение шкалы времени, a_{s1} – относительное отклонение частоты, a_{s2} – дрейф частоты на интервале $[t_k, t_{k+1}]$ (коэффициент a_{s2} рассчитывается только для бортовых часов системы GPS).

Релятивистская составляющая F_{rel} отнесена к долговременной составляющей в силу периодического характера проявления. Вызвана влиянием изменяющегося гравитационного поля Земли на частоту бортового КСЧ и формализуется как

$$\int_{t_k}^{t_{k+1}} F_{rel}(\tau) d\tau = \Delta T_{con} + \Delta T_{\sim}, \quad (5)$$

где ΔT_{con} – постоянное смещение часов, зависящее от значения главной полуоси орбиты спутника, и равна порядка 37 мкс;

ΔT_{\sim} – периодическое смещение часов, зависящее от параметров движения спутника (эксцентриситета, угловой аномалии, главной полуоси орбиты).

Проведенный анализ показал, что при расчете составляющей F_{rel} для построения прогнозов уходов бортовых часов присутствует неучтенная периодическая погрешность на уровне 0,1 нс и влияет на положение шкалы. Таким

образом для описания отклонения положений бортовой шкалы времени, вызванное эффектами релятивистской и гравитационной природы, автор вводит следующее уравнение связанное с выражением (5)

$$\begin{aligned}\Delta T_{rel} &= [\Delta f_{con} + \delta\Delta f_{con}] \cdot t + \Delta T_{\sim} + \delta\Delta T_{\sim} = \\ &= [446,47 \cdot 10^{-12} + \delta\Delta f_{con}]t - 2r \cdot v/c^2 + \delta\Delta T_{\sim},\end{aligned}\quad (6)$$

где $\delta\Delta f_{con}$ - смещение частоты, вызванный из-за отклонения главной полуоси орбиты НС от её номинального значения;

$\delta\Delta T_{\sim}$ - периодическая погрешность, порожденная влиянием второй сферической гармоникой разложения потенциала Земли J_2 .

Значение смещения частоты $\delta\Delta f_{con}$ относится к постоянной части уравнения 6 и зависит главным образом от отклонения главной полуоси орбиты НС a

$$\delta\Delta f_{con} = \frac{3}{2}GM \cdot \frac{(a - a_n)}{(a \cdot c)^2}, \quad (7)$$

где $GM = 398600,4418\text{км}^3/\text{с}^2$ - геоцентрическая константа гравитационного поля Земли с учетом атмосферы,

a_n - номинальное значение главной полуоси орбиты спутника.

Для расчета погрешности $\delta\Delta T_{\sim}$, которая имеет периодических характер, получается после аппроксимаций преобразованных уравнений, описывающих релятивистские проявления на НС, получено соотношение на основе кеплеровских элементов орбиты

$$\delta\Delta T_{\sim} = -\frac{1}{2} \frac{a_E^2}{a^2 c^2} J_2 [3\sqrt{GMa} \sin^2 i \sin 2u - 7 \frac{GM}{a} (1 - \frac{3}{2} \sin^2 i)t], \quad (8)$$

где J_2 - вторая зональная гармоника разложения потенциала Земли по сферическим функциям,

a_E - большая (экваториальная) полуось общеземного эллипсоида ПЗ-90-11;

c - скорость распространения радиосигнала;

i и u - отклонение и аргумент широты орбиты НС.

Кратковременная составляющая нестабильности частоты $w(t)$ трактуется как выходной сигнал некоторого формирующего фильтра, описывающегося в общем случае линейным дифференциальным уравнением вида

$$\sum_{j=0}^J b_j \cdot w^{(j)}(t) = \xi(t), w^{(j)}(t_0) = 0, j = 0, \dots, J - 1, \quad (9)$$

На входе формирующего фильтра действует порождающий центрированный случайный процесс $\xi(t) \in N(0, \sigma_{\xi}^2)$ типа «белый шум» с ограниченной

дисперсией. В задачах обработки результатов траекторных измерений используют дискретное представление уравнения (9) в виде уравнения авторегрессии

$$w(t_k) = \alpha_1 \cdot w(t_{k-1}) + \alpha_2 \cdot w(t_{k-2}) + \alpha_3 \cdot w(t_{k-3}) + \xi(t_k),$$

где α_i - коэффициент, непосредственно связанный с коэффициентами b_i уравнения (9).

Алгоритм идентификации параметров α_i кратковременной составляющей нестабильности частоты заключается в следующих операциях:

1. Статистическая обработка результатов траекторных измерений с целью извлечения информации о показаниях бортовых часов на определенном интервале времени.

2. Построение корреляционной функции производится из разности показаний часов $\Delta T(t_{k+1}) - \Delta T(t_k)$ и исключения путем оценивания параметров a_i долговременной нестабильности часов из уравнения (4).

3. Оценивание параметров α_i авторегрессии (9), выраженная через уравнение Юла-Уокера.

Привлечение модели авторегрессии (9) в прогнозировании текущих уходов бортовых часов позволит рассчитать оптимальный шаг извлечения информации.

Применяемые параметры прогнозирования в ГНСС формируются в виде частотно-временных поправок, включающие значения смещения шкалы времени и отклонение частоты бортовых часов. Такие параметры упрощенной математической модели не могут обеспечить качественную компенсацию уходов бортовых часов НС. Поэтому для повышения точности частотно-временного обеспечения ГЛОНАСС предложено расширить математическую модель нестабильности.

Для построения долговременных прогнозов необходимо учитывать не только параметры собственной нестабильности $s(t)$, но и уходы, вызванные релятивистскими эффектами $F_{rel}(t)$.

Определение отклонения часов является простой функцией смещения начального момента времени, смещения частоты и дрейфа частоты, а также воздействие шума:

$$\Delta T(t_{k+1}) = \Delta T(t_k) + s(t_k)(t_{k+1} - t_k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} w(\tau) d\tau + \int_{t_k}^{t_{k+1}} F_{rel}(\tau) d\tau,$$

где $\Delta T(t_{k+1})$ является смещением времени бортовых часов НС,

$\Delta T(t_k)$ - начальное смещение момента шкалы времени,

$s(t_k)$ - это долговременная нестабильность частоты на интервале времени $[t_k, t_{k+1}]$,

$w(\tau)$ - это кратковременная нестабильность частоты на интервале времени $[t_k, t_{k+1}]$,

$F_{rel}(\tau)$ - отклонение частоты бортовых часов, порожденных гравитационными и релятивистскими эффектами.

Прогнозирование уходов бортовых часов строится на основе математической модели полиномиального вида без привлечения параметров кратковременной нестабильности частоты $w(\tau)$, а также используют простое описание измерений частоты бортового стандарта, вызванное влиянием гравитационной и релятивистской природой. Поэтому прогнозируемая частотно-временная информации представляет собой параметры, характеризующие смещение шкалы времени и частоты часов.

Оценивание текущих уходов бортовых шкал времени НС ГНСС и сопоставление с соответствующими аналитическими шкалами времени, построенных на основе ЧВП (рисунок 2 и рисунок 3) проводилось в пункте ГСВЧ ФГУП «СНИИМ» на базе государственного вторичного эталона времени и частоты ВЭТ 1-19.

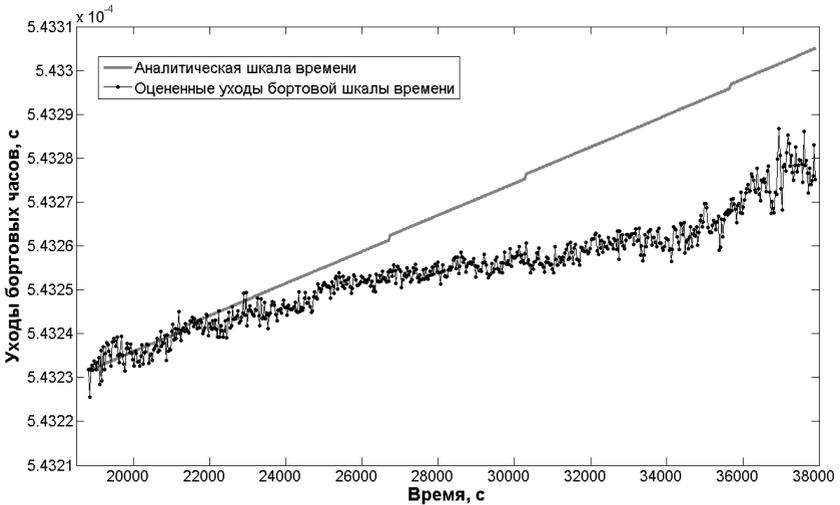


Рисунок 2 — Текущие значения моментов бортовой шкалы времени НС 732 и соответствующая аналитическая шкала

Рисунки 2 и 3 иллюстрируют оценки текущих положений бортовых часов НС ГЛОНАСС № 732 и № 716 и соответствующие им аналитические шкалы времени в виде кусочно-линейной функции, рассчитанные с помощью ЧВП. Расчеты проводились на радиовидимом интервале времени прохождения НС на за 02.09.2014 в пункте ГСВЧ ФГУП «СНИИМ».

На рисунке 2 проиллюстрирован случай ошибочного оценивания изменения частоты бортовых часов НС № 732 на этапе формирования прогноза. Сравнение результатов полученных оценок текущих уходов и аналитической шкалы времени показало, что расхождение этих шкал составляет до 5 мкс. Случай на

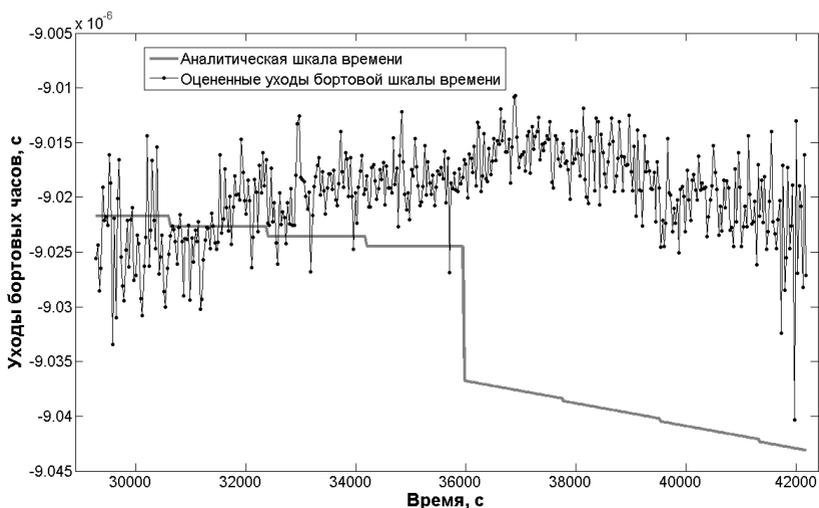


Рисунок 3 — Текущие значения моментов бортовой шкалы времени НС 716 и соответствующая аналитическая шкала

рисунок 3 иллюстрирует ошибку в прогнозировании положения шкалы времени бортовых часов НС № 716. Подобное ошибочное прогнозирование частотно-временных параметров бортовых часов НС служит причиной возникновения погрешности в результатах беззапросных кодовых и фазовых траекторных измерений.

Также процедура оценивания текущих уходов бортовых часов была применена к данным, полученным на пунктах ГСВЧ (п. Менделеево, г. Новосибирск, г. Иркутск). Это позволило решить задачи по оцениванию бортовых шкал времени и сформировать статистические характеристики — математическое ожидание и СКО — указанных погрешностей (рисунки 4 и 5). Результаты оценивания погрешностей представления бортовых шкал времени частотно-временными поправками получены в режиме, регламентированном для работы ГСВЧ, т.е. с использованием в качестве исходных данных сигналов стандартной точности и проведением сеансов измерений по западному расписанию.

Полученные результаты применяются для обеспечения функционирования региональной сети базовых станций ГНСС по Новосибирской области в целях информирования потребителей о качестве частотно-временной информации.

В **третьей главе** изложена теоретическая основа разработанного алгоритма оценивания параметров нестабильности бортовых часов на основе траекторных измерений.

Повышение точности и достоверности получаемых результатов оценивания уходов бортовых часов достигнуто за счет выполнения следующих шагов:

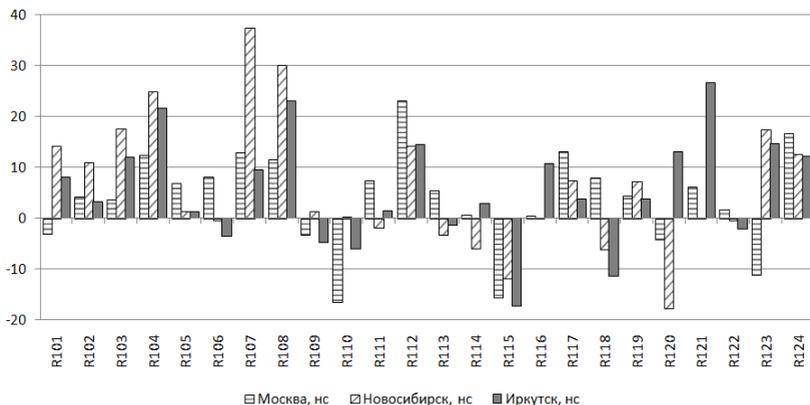


Рисунок 4 — Математическое ожидание погрешностей частотно-временных поправок ОГ ГЛОНАСС

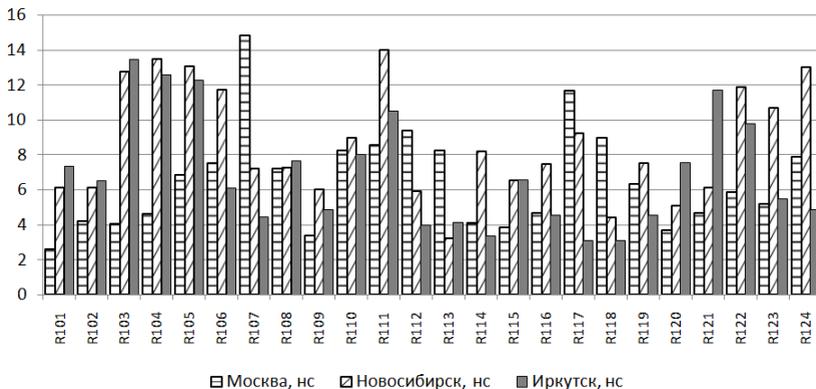


Рисунок 5 — СКО погрешностей частотно-временных поправок ОГ ГЛОНАСС

1. Привлечение фазовых траекторных измерений, обладающих меньшим уровнем шума.
2. Использование результатов беззапросных кодовых и фазовых траекторных измерений в формате RINEX со станций ГСВЧ, СДКМ, IGS.
3. Использование в качестве опорной шкалы времени государственного вторичного эталона времени и частоты ВЭТ 1-19.
4. Расчет геометрической дальности с помощью точных координат антенных модулей и высокоточных моделей численного интегрирования уравнений движения НС.
5. Формирование линейной комбинации для разрешения фазовой неоднозначности.
6. Использование безионосферной комбинации.
7. Оценивание тропосферной задержки.

8. Учет влияния гравитационного потенциала Земли на параметры орбиты НС.

9. Исключение влияния многолучевости на этапе предварительной обработки результатов беззапросных кодовых и фазовых траекторных измерений.

10. Планирование и организация измерительных экспериментов.

Четвертая глава содержит основные результаты экспериментальных исследований разработанной методики оценивания параметров нестабильности частоты бортовых часов на основе беззапросных кодовых и фазовых траекторных измерений.

Методика включает в себя:

— высокоточное оценивание текущих уходов бортовых часов в условиях использования в качестве опорного стандарта частоты вторичного эталона времени ВЭТ 1-19;

— оценивание погрешности представления бортовых ЧВП текущих уходов бортовых часов и проведение мониторинга качества частотно-временной информации в рамках сети базовых станций ГНСС по Новосибирской области;

— параметрическую идентификацию нестабильности частоты бортовых часов;

— оценивание смещения частоты квантовых стандартов, вызванное эффектами гравитационной и релятивистской природой;

— построение уточненных математических моделей нестабильности частоты и последующее прогнозирование уходов бортовых часов в режиме Ultra-rapid для использования пользователями сети базовых станций ГНСС Новосибирской области.

Преимущество предлагаемой методики состоит в повышении точности результатов оценивания параметров нестабильности бортовых часов за счет привлечения:

— фазовых измерений и, как следствие, уменьшении шумовой составляющей в траекторных измерениях;

— использовании высокоточных эфемерид, оцененных в ФГУП «СНИИМ»;

— использовании в качестве опорного хранителя времени эталон ВЭТ 1-19;

— использовании прецизионной аппаратуры приема радионавигационных сигналов.

В случае расположения высокостабильных часов на высокодинамическом объекте или при изменении уровня гравитационного потенциала, возникает необходимость определения влияния гравитационных и релятивистских эффектов на его частоту.

При участии автора в ФГУП «СНИИМ» в обеспечении работ по гранту Российского научного фонда N14-28-00068 «Разработка фундаментальной теории, методов и алгоритмов координатно-временного и навигационного обеспечения для решения приоритетных государственных задач геодезии и дистанци-

онного зондирования с учетом классических и релятивистских эффектов гравитационного поля Земли и других массивных тел Солнечной системы» экспериментальные исследования. Целью таких исследований было получение количественных оценок изменения частоты водородного стандарта частоты типа Ч1-1006, связанных с изменением гравитационного потенциала Земли от перемещения указанного стандарта на высоту около 830 метров.

В эксперименте по оцениванию изменений частоты водородного стандарта типа Ч1-1006, связанных с перемещением этого стандарта на разные уровни гравитационного поля Земли, выполнялись синхронные фазовые траекторные измерения по навигационным спутникам GPS. Использовались приёмник Javad Sigma в местах расположения перемещаемого стандарта Ч1-1006 и однотипный приёмник из состава вторичного эталона времени и частоты ВЭТ 1-19 (ФГУП «СНИИМ»).

Результаты измерений разностей текущих значений моментов шкал времени UTC(Nm) – Tst для пунктов нахождения стандарта Ч1-1006 в п. Шебалино и перевал Семинский (рисунок 6). На рисунках показана трендовая составляющая к изменению моментов шкал времени, полученная МНК, которая и характеризует значения частот стандарта Ч1-1006 в пунктах нахождения стандарта.

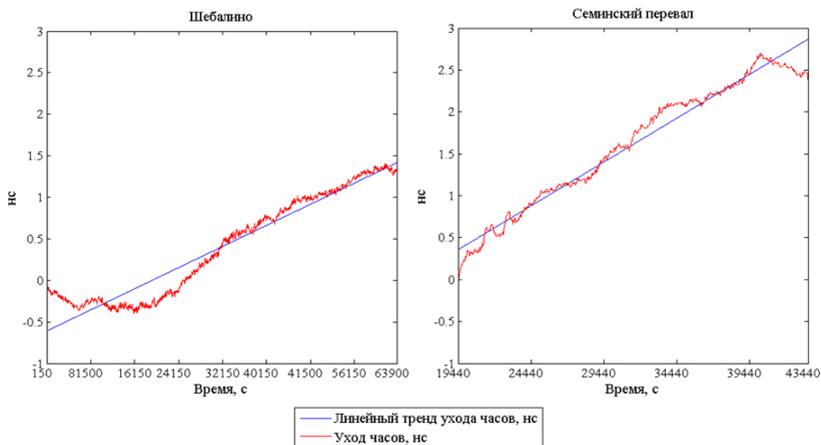


Рисунок 6 — Отклонения перевозимого водородного стандарта Ч1-1006

В п. Шебалино ход шкалы времени составил 1.75 нс на интервале времени 63900 секунд, что соответствует частоте $2.736 \cdot 10^{-14}$. На перевале «Семинский» ход шкалы времени стандарта составил 2.55 нс на интервале времени 23790 секунд, что соответствует частоте стандарта $10,71 \cdot 10^{-14}$. Таким образом, изменение частоты стандарта Ч1-1006, связанное с его перемещением от п. Шебалино на перевал «Семинский», измеренное в системе вторичного эталона ВЭТ 1-19 составило $7.964 \cdot 10^{-14}$.

В качестве иллюстрации приведены графики измерения моментов шкал времени стандарта частоты Ч1-1006 в поселке Шебалино и на Семинском перевале (рисунок 6) в близких температурных диапазонах на период проведения измерений с 22.06.2015 г. по 24.06.2015 г.

Полученное значение хорошо согласуется с результатами аналитических расчетов и гравиметрических измерений, таким образом автор подтвердил работоспособность и эффективность разработанной методики оценивания частоты пространственно-разнесенных часов по данным беззапросных фазовых измерений, позволяющих выявить тонкие эффекты в оценивании частоты релятивистского происхождения.

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

1. Решена задача оценивания с требуемой точностью параметров нестабильности бортовых часов навигационных спутников ГНСС по данным беззапросных кодовых и фазовых траекторных псевдодальномерных измерений с погрешностью не превышающей 1 нс.
2. Высокая точность и достоверность результатов оценивания обеспечена:
 - применением при траекторных измерениях в качестве опорных сигналов Государственного вторичного эталона единиц времени, частоты и шкалы времени ВЭТ 1-19 метрологического пункта ГСВЧ в ФГУП «СНИИМ» (г. Новосибирск);
 - использованием в качестве исходных данных для оценивания результатов траекторных измерений по навигационным спутникам ГНСС, выполняемых в метрологических пунктах ГСВЧ (п. Менделеево, г. Новосибирск, г. Иркутск, г. Хабаровск), оснащенных эталонами единиц времени, частоты и шкалы времени;
 - использованием оригинальных алгоритмов оценивания текущих моментов шкал времени и частот генераторов бортовых часов с применением расширенных математических моделей нестабильности бортовых стандартов частоты.
3. По результатам оценивания текущих моментов шкал времени бортовых часов навигационных спутников ГНСС проведены исследования погрешностей представления этих бортовых шкал времени с помощью бортовых частотно-временных параметров (ЧВП), транслируемых потребителю в составе навигационного радиосигнала. Исследования показали недостаточную (в 30 % случаев) точность представления бортовых шкал ГЛОНАСС с помощью ЧВП и наличие таких погрешностей для бортовых шкал GPS.
4. Реализован расчет поправок к моментам бортовых шкал времени в режиме Ultra-rapid, что потребовало введение в состав математических моделей нестабильности частоты бортовых стандартов составляющих, учитывающих изменения частоты стандарта вследствие из-

менения уровня гравитационного потенциала при движении спутника по орбите.

5. Апостериорные оценки погрешностей представления бортовых шкал времени с помощью бортовых ЧВП и Ultra-rapid поправки передаются для пользователей сети базовых ГНСС-станций Новосибирской области и других региональных пользователей.
6. Адекватность математических моделей нестабильности, учитывающих изменения гравитационного потенциала для квантовых стандартов частоты, проверялась в эксперименте, проводимом совместно ФГУП «СНИИМ» и ФГБОУ ВО «СГУГиТ» (г. Новосибирск) в республике Алтай. Результаты эксперимента хорошо согласуются с полученными теоретическими положениями и с результатами гравиметрических измерений.

Публикации автора по теме диссертации

1. Chronometric Measurement of Orthometric Height Differences by Means of Atomic Clocks / E. A. Khanykova [et al.] // *Gravitation and Cosmology*. — 2016. — Vol. 22, no. 3. — Pp. 234–244.
2. Ханыкова Е. А., Толстиков А. С., Карауш А. А. Оценивание частоты пространственно-разнесенных часов на основе фазовых ГНСС измерений // *Успехи современной радиоэлектроники*. — 2015. — Т. 1, № 10. — С. 82–84.
3. Ханыкова Е. А., Толстиков А. С. К задаче контроля частотно-временных параметров навигационного поля ГЛОНАСС // *Известия Томского политехнического университета*. — 2015. — Т. 326, № 5. — С. 114–120.
4. Ханыкова Е. А. Частотно-временная основа координатно-временных определений в ГНСС-технологиях // *Геодезия и картография*. — 2015. — № 2. — С. 25–30.
5. Частотно-временные определения в спутниковых навигационных технологиях / Е. А. Ханыкова [и др.] // *Успехи современной радиоэлектроники*. — 2015. — № 1. — С. 44–48.
6. Ханыкова Е. А., Толстиков А. С. О метрологическом обеспечении сети активных базовых ГНСС-станций Новосибирской области // *Приборы*. — 2014. — Т. 171, № 9. — С. 34–38.
7. Анализ точностных характеристик ИТНП БИС 14Ц161 на этапе подготовки к проведению комплексных испытаний и МВИ сети 14Ц160» (шифр СЧ ОКР «НКУ ОЦЕНКА СНИИМ») / Е. А. Ханыкова [и др.] // Отчет №1-2/8-11, составная часть ОКР «НКУ ГЛОНАСС» на основании федеральной целевой программы «Глобальная навигационная система» на 2002-2011 гг. (постановление Правительства РФ 20 августа 2001 г. №587). — 2011. — С. 151.

8. *Ханыкова Е. А., Толстиков А. С., Карауш А. А.* Модернизация комплексов хранения национальной шкалы времени UTC(SU) в интересах достижения заданных тактико-технических характеристик системы ГЛОНАСС в части вторичного эталона единиц времени и частоты ВЭТ1-19 (шифр «Шкалы – НМ») // Отчет № , составная часть ОКР «Модернизация комплексов хранения национальной шкалы времени UTC(SU) в интересах достижения заданных тактико-технических характеристик системы ГЛОНАСС» на основании федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» на 2012-2020 гг. (постановление Правительства РФ от 3 марта 2012 г. №189, ГК №220 – 313 от 23 июля 2012 г.) – 2013. – С. 68.
9. *Ханыкова Е. А., Карауш А. А., Безродных А. Р.* Разработка методики совершенствования и улучшения точностных характеристик системы ГЛОНАСС // Отчет № 80, Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Разработка методики совершенствования и улучшения точностных характеристик системы ГЛОНАСС» по субсидии в виде муниципального гранта мэрии города Новосибирска молодым ученым и специалистам (постановление мэрии г. Новосибирска от 26.07.2010 г. №242). – 2015. – С. 72.
10. *Ханыкова Е. А., Карауш А. А., Толстиков А. С.* Оценивание текущих навигационных параметров КА ГНСС с использованием метода инструментальных переменных // Материалы VIII Международного симпозиума «Метрология времени и пространства», 14-16 сентября 2016 г., г. Санкт-Петербург. - Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». – 2016. – С. 160–163.
11. *Ханыкова Е. А., Толстиков А. С., Томилов А. С.* Характеристики алгоритмов формирования групповых шкал хранителей времени // Труды ИПА РАН. Вып. 27. – СПб. – 2013. – С. 320–325.
12. Контроль бортовых шкал времени навигационных спутников «Глонасс» в метрологических пунктах государственной службы времени и частоты / Е. А. Ханыкова [и др.] // 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 общ. ред. Н. А. Тестоедова ; ОАО «Информационные спутниковые системы» ; Сиб. гос. аэрокосмич. Ун-т. – Красноярск. – 2012. – С. 245–247.
13. 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.

14. *Khanykova E. A., Karaush A. A., Bezrodnykh A. R.* Algorithmic Ways to Improve the Precise and Reliability of the Time-frequency Definitions for GNSS Technologies // 2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) – 34006 Proceedings. – 2014. – Pp. 179–183.
15. *Ханыкова Е. А., Толстиков А. С., Горбачева О. И.* Сравнительный анализ алгоритмов формирования шкал групповых хранителей времени // Материалы XI международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП 2012) в 7 т. Т. 3. – Новосибирск: НГТУ. – 2012. – С. 47–51.
16. *Ханыкова Е. А., Карауш А. А., Безродных А. Р.* Использование псевдодальномерных фазовых измерений для сравнения шкал времени пространственно-разнесённых часов // Современные проблемы радиоэлектроники: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. (Красноярск, 6–8 мая, 2014 г.). – Красноярск: Изд-во СФУ. – 2014. – С. 259–263.
17. *Ханыкова Е. А., Толстиков А. С., Загорючкина Н. В.* Оценка ухода бортовых часов по данным траекторных измерений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. VIII Междунар. науч. конгресс, 10-20 апреля 2012 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии»: сб. материалов в 2 т. Т.2. - Новосибирск: СГГА. – 2012. – С. 229–232.
18. О влиянии нестабильности часов на точность координатно-временных определений спутниковых навигационных технологиях / Е. А. Ханыкова [и др.] // Интерэкспо ГЕО-Сибирь - 2013. IX Междунар. науч. конгр., 15-26 апреля 2013 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013»: сб. материалов в 3 т. Т.2. - Новосибирск: СГГА. – 2013. – С. 36–40.
19. *Ханыкова Е. А., Карауш А. А., Толстиков А. С.* Оценка эфемеридно-временных параметров орбитальной группировки ГЛОНАСС // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конг., 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014»: сб. материалов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск: СГГА. – 2014. – С. 8–13.
20. *Ханыкова Е. А., Тиссен В. М.* Исследование нестабильностей атомных часов методами имитационного моделирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конг., 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014»: сб. материалов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск: СГГА. – 2014. – С. 110–114.
21. *Ханыкова Е. А., Карауш А. А., Толстиков А. С.* Методика оценивания характеристик нестабильности бортовых часов навигационных спутников ГЛОНАСС // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр., 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «СибОп-

- тика-2015»: сб. материалов в 3 т. Т. 3. – Новосибирск: СГУГиТ, 2015. – Новосибирск: СГГА. – 2015. – С. 62–66.
22. О метрологических характеристиках частотно-временной основы ГЛОНАСС / Е. А. Ханыкова [и др.] // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр., 18-22 апреля 2016 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016»: сб. материалов в 2 т. Т.1. – Новосибирск: СГУГиТ. – 2016. – С. 211–215.
 23. Ханыкова Е. А., Карауш А. А. Некоторые подходы к повышению точности эфемеридно-временной информации спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС // Труды Всероссийской молодёжной научно-практической конференции «Малые Винеровские Чтения 2013». – 2013. – С. 92–96.
 24. Контроль характеристик навигационного поля ГЛОНАСС на метрологических пунктах ГСВЧ / Е. А. Ханыкова [и др.] // Винеровские Чтения 2014: материалы Всерос. молодёжной науч.-практ. конф. с международ. участ. (Иркутск, 2014 г.). – Иркутск: Изд-во ИрГТУ. – 2014. – С. 150–157.
 25. Предварительная обработка траекторных измерений для оценивания уходов бортовых часов спутников ГЛОНАСС / Е. А. Ханыкова [и др.] // Винеровские Чтения 2015: труды Всерос. молодёжной науч.-практ. конф. (Иркутск, 16-18 апреля, 2015 г.). – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ. – 2015. – С. 94–98.
 26. Ханыкова Е. А. Оценивание уходов бортовых шкал относительно момента шкалы времени Центрального синхронизатора СНС по данным траекторных измерений // LX Студенческая научная конференция, 23-28 апреля 2012 г., Новосибирск: сб. тезисов докладов. - Новосибирск: СГГА. – 2012. – С. 21–22.

Ханыкова Екатерина Андреевна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ
НЕСТАБИЛЬНОСТИ БОРТОВЫХ ЧАСОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ
ГЛОНАСС ПО ДАННЫМ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

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

Отпечатанно в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз.
Заказ № 2282. Подписано в печать 02.11.2016.

