

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «СИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»

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»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Толстикова Александр Сергеевич

Новосибирск — 2016

Оглавление

| | Стр. |
|--|------|
| Введение | 5 |
| Глава 1. Постановка и обсуждение задачи оценивания параметров неустойчивости бортовых часов навигационных спутников . | 11 |
| 1.1 О влиянии уходов шкал времени часов на точность решения координатно-временных задач | 11 |
| 1.2 Математические модели неустойчивости часов на основе квантовых стандартов частоты | 15 |
| 1.2.1 Описание неустойчивости частоты часов | 15 |
| 1.2.2 Наземные часы | 17 |
| 1.2.3 Бортовые часы | 19 |
| 1.3 Меры неустойчивости часов: долговременная и кратковременная составляющие неустойчивости | 21 |
| 1.4 Исходная информация для оценивания параметров неустойчивости бортовых часов | 23 |
| 1.4.1 Уравнения кодовых и фазовых измерений | 23 |
| 1.4.2 Оценивание шкал времени | 25 |
| 1.4.3 Оценивание частот | 28 |
| 1.5 Основные задачи спутниковых навигационных технологий, приводящие к оцениванию параметров неустойчивости часов . . . | 29 |
| 1.6 Пути повышения точности и достоверности результатов контроля бортовых шкал. Развитие орбитального метода | 30 |
| 1.7 Основные результаты и выводы | 32 |
| Глава 2. Идентификация неустойчивости часов и прогнозирование уходов бортовых часов | 33 |
| 2.1 Параметрическая идентификация долговременной неустойчивости в классе полиномов. Оценка характеристик релятивистских эффектов | 33 |
| 2.2 Параметрическая идентификация кратковременной неустойчивости в классе уравнений авторегрессии | 38 |

| | | |
|-----|---|----|
| 2.3 | Прогнозирование уходов бортовых часов на основе математических моделей нестабильности частоты | 39 |
| 2.4 | Оценка точности прогнозных значений уходов бортовых часов . . . | 41 |
| 2.5 | Основные результаты и выводы | 44 |

Глава 3. Разработка алгоритмов статистического оценивания параметров нестабильности бортовых часов по данным беззапросных траекторных измерений

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1 | Предварительная обработка данных траекторных измерений | 46 |
| 3.1.1 | Погрешности, порожденные внешними факторами | 46 |
| 3.1.2 | Методы предварительной обработки траекторных измерений | 47 |
| 3.2 | Анализ влияния многолучевости на качество траекторных измерений | 49 |
| 3.3 | Построение адекватной математической модели нестабильности частоты | 53 |
| 3.4 | Разработка алгоритма прогнозирования уходов бортовых часов на основе полученной математической модели на определённом интервале времени | 54 |
| 3.5 | Алгоритм построения групповой шкалы времени часов | 55 |
| 3.6 | Исследование точности оценивания и выбор конструктивных параметров алгоритма из условия достижения минимальных погрешностей | 60 |
| 3.7 | Планирование и организация измерительных экспериментов | 61 |
| 3.8 | Основные выводы и заключение | 63 |

Глава 4. Экспериментальные исследования алгоритмов оценивания параметров нестабильности часов по данным траекторных измерений

| | | |
|-----|---|----|
| 4.1 | Анализ проявления многолучевости распространения радиосигналов (сравнение антенных модулей) | 65 |
| 4.2 | Оценивание погрешностей представления бортовой шкалы времени с помощью ЧВП в условиях применения эталона времени и частоты ВЭТ 1-19 | 70 |
| 4.3 | Алгоритмы сравнения частот пространственно-разнесенных стандартов частоты по данным беззапросных фазовых измерений . | 73 |

| | | |
|-----|---|------------|
| 4.4 | Анализ проявления влияния гравитационных эффектов на частоту стандарта | 75 |
| 4.5 | Перспективы использования разработанных методов и алгоритмов оценивания параметров нестабильности часов в региональной системе дифференциальной коррекции и мониторинга навигационного поля ГЛОНАСС/GPS Новосибирской области | 77 |
| 4.6 | Основные результаты и выводы | 81 |
| | Заключение | 82 |
| | Список сокращений и условных обозначений | 84 |
| | Список литературы | 86 |
| | Приложение А. Меры нестабильности частоты квантовых стандартов | 94 |
| | Приложение Б. Влияние релятивистских эффектов на частоту бортовых часов | 99 |
| | Приложение В. Акты внедрения | 101 |

Введение

Актуальность диссертационной работы. 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 борт 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. Решет-

нев, 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 результатов 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.». При этом 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 беззапрос-

ных 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 натурных 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.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и трех приложений. Полный объём диссертации составляет 104 страницы, включая 18 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 77 наименований.

Глава 1. Постановка и обсуждение задачи оценивания параметров неустойчивости бортовых часов навигационных спутников

1.1 О влиянии уходов шкал времени часов на точность решения координатно-временных задач

С появлением глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС, GPS, Galileo в околоземном пространстве создано поле навигационных радиосигналов. Находящийся в этом поле потребитель навигационной информации с помощью специальной аппаратуры (ресивера) получает возможность решать следующие задачи:

- определение текущих координат потребителя $\mathbf{u}_R^T(t) = [x_R(t), y_R(t), z_R(t)]$ в связанной с вращающейся Землей системой координат (СК);
- определение параметров движения потребителя, в частности вектора скоростей $\dot{\mathbf{u}}_R^T(t) = [\dot{u}_{xR}(t), \dot{u}_{yR}(t), \dot{u}_{zR}(t)]$;
- воспроизведение текущего момента шкалы времени ГНСС $T_R(t)$, согласованного со шкалой UTC [1].

В математическом плане указанные задачи навигационно-временных определений сводятся к текущему оцениванию вектора навигационных параметров потребителя

$$\mathbf{q}_R^T(t) = [\mathbf{u}_R^T(t), \dot{\mathbf{u}}_R^T(t), \Delta T_R(t)] \quad (1.1)$$

путем решения относительно вектора $\mathbf{q}_R^T(t)$ системы алгебраических уравнений (в общем случае нелинейной)

$$\mathbf{D}(t) = \mathbf{F} [q_{S_i}^T(t), i = 1, \dots, n, \mathbf{q}_R^T(t)] + \delta(t) \quad (1.2)$$

с неточно заданной правой частью.

В уравнении (1.2) приняты следующие обозначения:

$\mathbf{D}(t)$ - вектор измеренных дальностей $D_i(t)$ от каждого i -ого навигационного спутника радиовидимой орбитальной группировки спутников $i = 1, \dots, n$ до антенного модуля ресивера потребителя;

$\mathbf{q}_{S_i}^T(t) = [\mathbf{u}_{S_i}^T(t), \dot{\mathbf{u}}_{S_i}^T(t), \ddot{u}_{S_i}(t), \Delta T_{S_i}(t)]$ - расширенный вектор состояния каждого i -ого навигационного спутника, включающий в себя

$\mathbf{u}_{S_i}^T(t) = (x_{S_i}(t), y_{S_i}(t), z_{S_i}(t))$ - вектор текущих координат i -ого навигационного спутника, определенный в связанной с Землей системой координат (СК);

$\dot{\mathbf{u}}_{S_i}^T(t) = (\dot{x}_{S_i}(t), \dot{y}_{S_i}(t), \dot{z}_{S_i}(t))$ - вектор скоростей i -ого навигационного спутника;

$\ddot{\mathbf{u}}_{S_i}(t) = (\ddot{x}_{S_i}(t), \ddot{y}_{S_i}(t), \ddot{z}_{S_i}(t))$ - вектор ускорений i -ого навигационного спутника, в уравнении движения спутника принимающих смысл действующих на спутник возмущений;

$\Delta T_{S_i}(t)$ - уход шкалы времени бортовых часов i -ого навигационного спутника относительно момента системной шкалы времени;

$\delta(t)$ - вектор факторов, влияющих на точность измерения геометрических дальностей от навигационных спутников до антенного модуля ресивера потребителя;

$\mathbf{F} [\mathbf{q}_{S_i}^T(t), i = 1, \dots, n, \mathbf{q}_R^T(t)]$ - известная вектор-функция, допускающая дифференцирование по элементам расширенных векторов состояния навигационных спутников $x_{S_i}(t), y_{S_i}(t), z_{S_i}(t), \Delta T_{S_i}(t)$ и элементам вектора навигационных параметров потребителя $x_R(t), y_R(t), z_R(t), \Delta T_R(t)$.

Очевидно, что необходимым условием обеспечения требуемой точности решения навигационных задач (оценивания вектора навигационных параметров потребителя $\mathbf{q}_R(t), i = 1, \dots, n$ в уравнении измерений (1.2) являются знание с достаточной точностью векторов состояния навигационных спутников и обеспечение малости уровней влияющих факторов $\delta(t)$.

На момент решения навигационных задач потребителя эти составляющие векторов $\mathbf{q}_{S_i}(t), i = 1, \dots, n$ предоставляются в виде некоторых прогнозных значений $\vec{\mathbf{q}}_{S_i}(t), i = 1, \dots, n$, рассчитанных с помощью математических моделей движения навигационных спутников (составляющие $\vec{\mathbf{u}}_{S_i}^T(t), \vec{\dot{\mathbf{u}}}_{S_i}^T(t), \vec{\ddot{\mathbf{u}}}_{S_i}(t)$) и упрощенных математических моделей нестабильности бортовых часов (составляющие $\Delta \vec{T}_{S_i}(t)$). Эти прогнозные значения передаются в составе навигационного сообщения в виде эфемерид [1].

Совершенно очевидно, что погрешности прогнозирования навигационных параметров спутников

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{S_i}(t) &= \vec{\mathbf{u}}_{S_i}(t) - \mathbf{u}_{S_i}(t); \\ \mathbf{e}_{\dot{\mathbf{u}}_{S_i}}(t) &= \vec{\dot{\mathbf{u}}}_{S_i}(t) - \dot{\mathbf{u}}_{S_i}(t); \\ \mathbf{e}_{\ddot{\mathbf{u}}_{S_i}}(t) &= \vec{\ddot{\mathbf{u}}}_{S_i}(t) - \ddot{\mathbf{u}}_{S_i}(t); \end{aligned} \quad (1.3)$$

и погрешности прогнозирования уходов шкал времени бортовых часов

$$e_{T_{Si}}(t) = \Delta \vec{T}_{Si}(t) - \Delta T_{Si}(t) \quad (1.4)$$

непосредственно влияют на точность позиционирования потребителя.

При этом необходимо заметить, что погрешность прогнозирования уходов шкал времени потребителя влияет в большей степени на точность позиционирования, по сравнению с погрешностями эфемерид из уравнения (1.3), поскольку бортовые часы участвуют в измерениях дальностей $D_i(t)$ от спутников до потребителя. Образование погрешности измерения дальности иллюстрируется на рисунке 1.1.

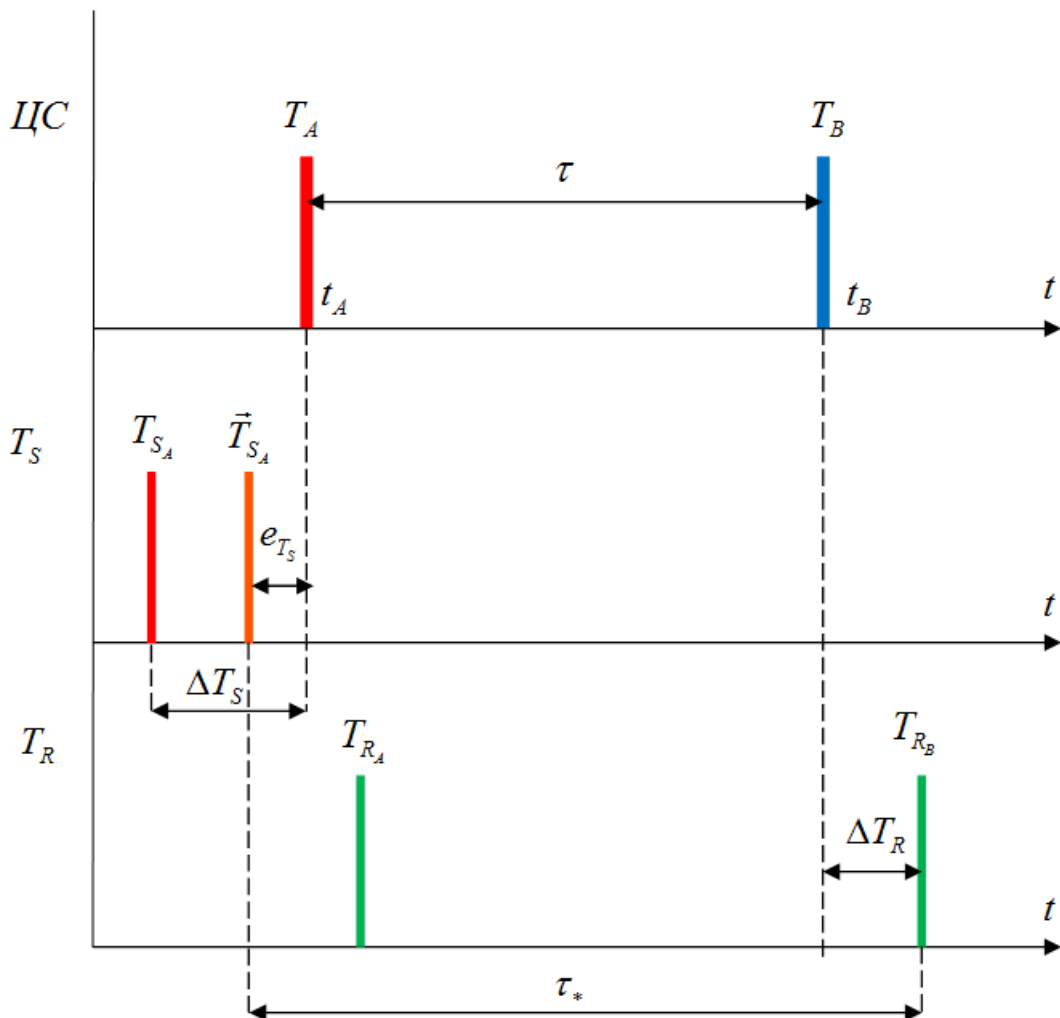


Рисунок 1.1 — Возникновение погрешности измерения интервала времени прохождения навигационного сигнала $e = \tau_* - \tau$ вследствие уходов шкалы бортовых часов и ухода шкалы ресивера

На рисунке 1.1 событие А соответствует моменту выхода навигационного сигнала с антенны спутника в шкале Центрального синхронизатора системы (ЦС), а событие В – приход навигационного сигнала на антенну ресивера. Интервал времени $\tau = T_B - T_A$ является мерой дальности от спутника до потребителя. В шкале времени бортовых часов T_S и часов ресивера T_R события А и В воспроизводятся с погрешностями ΔT_S и ΔT_R , обусловленными нестабильностями параметров этих часов. Уход шкалы времени бортовых часов ΔT_S частично компенсируется прогнозом положения бортовой шкалы времени \vec{T}_{S_A} , рассчитанным с помощью бортовых частотно-временных поправок (ЧВП). Погрешность прогнозирования ухода бортовой шкалы e_{T_S} и уход часов ресивера e_{T_R} порождает погрешность измерения интервала времени прохождения навигационного радиосигнала от спутника до потребителя $e = \tau_* - \tau$ (рисунок 1.1), которая в последствии присутствует в результатах координатно-временных определений (КВО).

Необходимо отметить, что если в прогнозировании движения спутника имеется значительный прогресс, то с прогнозированием уходов бортовых шкал времени на основе математических моделей нестабильности частоты ситуация гораздо хуже.

Проведенные исследования [2] показали, что в ряде случаев имеются большие погрешности представления текущих моментов бортовых шкал времени с помощью аналитических шкал времени, рассчитанных с применением бортовых ЧВП. Полученные оценки погрешностей представления текущих моментов шкал времени навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS лишь в 70 % случаев удовлетворяют предъявляемым требованиям к точности [2], [3].

Эти обстоятельства делают необходимым разработку методик и алгоритмов оценивания моментов бортовых шкал времени по данным траекторных измерений:

- построение и исследование адекватных параметрических моделей нестабильности часов на основе квантовых стандартов частоты (КСЧ), как бортовых, так и наземных;

- исследование погрешностей идентификации параметров моделей нестабильности частот на основе КСЧ.

1.2 Математические модели нестабильности часов на основе квантовых стандартов частоты

1.2.1 Описание нестабильности частоты часов

В п. 1.1 было показано, что точность и надежность решения задач потребителя зависит от:

- правильности измерений интервалов времени, которые являются мерой дальности от навигационных спутников до потребителя;
- правильности фиксации моментов шкал времени, от которых идет отсчет измеренных интервалов времени.

Реализация спутниковых технологий предполагает, что уходы шкал времени бортовых часов компенсируется путем применения ЧВП, передаваемых потребителю в составе навигационного сообщения, а уходы шкалы времени ресивера вводится в разряд оцениваемых параметров, совместно с координатами потребителя [4], [5], [6].

Проведенные исследования показывают [2], что как для бортовых часов, так и для часов ресивера такие подходы не обеспечивают полной компенсации уходов шкал времени. Причем методика компенсации уходов бортовых шкал времени предполагает существование большего количества источников погрешностей, чем для шкал времени ресивера.

По этой причине в качестве основного объекта исследований в диссертационной работе рассматриваются бортовых часы, построенные на основе квантовых стандартов частоты. Эти исследования включают:

- анализ факторов, порождаемых нестабильностями характеристик часов;
- обоснованный выбор адекватных математических моделей нестабильности применяемых часов;
- идентификацию параметров математических моделей нестабильности часов;
- разработку алгоритмов оценивания текущих значений уходов бортовых шкал времени по данным траекторных измерений и расчет статистических характеристик погрешностей такого оценивания;

— прогнозирование уходов часов на основе математических моделей нестабильности частоты.

В общем виде уходы шкал времени рассматриваемых типов часов $\Delta T(t) = \Delta T_S(t) = \Delta T_R(t)$ относительно эталонных шкал времени часов связаны с относительным отклонением частоты $\Delta f(t)$ применяемых стандартов относительно эталонной частоты в силу дифференциального уравнения

$$\Delta \dot{T}(t) = \frac{dT(t)}{dt} = \Delta f(t), \quad \Delta T(t) = \Delta T_0 \quad (1.5)$$

где

$$\Delta f(t) = \frac{\nu(t) - \nu_3}{\nu_3}$$

- относительное отклонение частоты стандарта, $\nu(t)$ - действительное значение частоты, ν_3 - эталонное значение частоты. Флуктуации указанной величины $\nu(t)$ в окрестности номинального значения ν_3 являются нестабильностью частоты часов.

Нестабильность частоты принято представлять как собственную нестабильность, а также дополнительную нестабильность, порожденную внешними факторами, связанными с условиями, в которых находятся часы. К таким факторам относят влияние гравитационного поля Земли, флуктуации температуры, вибрации [7], [8], [9].

Следуя [8], [9], [10], в собственной нестабильности частоты квантовых стандартов частоты принято выделять долговременную составляющую нестабильности $s(t)$ и кратковременную составляющую $w(t)$, а также вызванную эффектами гравитационной и релятивистской природы составляющую $F_{Rel}(t)$. Это позволяет представить относительное отклонение частоты генератора часов от эталонного значения во временной области в виде суммы [9], [11]

$$\Delta f(t) = s(t) + w(t) + F_{rel}(t). \quad (1.6)$$

В дискретном виде уход шкалы времени $\Delta T(t_k)$ на интервале $t \in [t_k, t_{k+1}]$ с учетом уравнений (1.5) и (1.6) представляется равенством

$$\Delta T(t_{k+1}) = \Delta T(t_k) + s(t) \cdot (t - t_k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} w(\tau) d\tau + \int_{t_k}^{t_{k+1}} F_{rel}(\tau) d\tau, \quad (1.7)$$

$$\Delta \dot{T}(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\Delta T(t_{k+1}) - \Delta T(t_k)}{t_{k+1} - t_k}, \quad h = t_{k+1} - t_k. \quad (1.8)$$

Долговременная составляющая $s(t)$, определенная на интервале времени более одного часа, представляется гладкой функцией, допускающей параметрическое разложение в той или иной системе базисных функций [9]. Кратковременная составляющая $w(t)$ трактуется как выходной сигнал некоторого формирующего фильтра, на входе которого действует порождающий центрированный случайный процесс типа «белый шум» с ограниченной дисперсией. Как правило, долговременную составляющую неустойчивости частоты $s(t)$ достаточно хорошо описывают модели полиномиального типа, а модели в виде динамических звеньев лучше представляют компоненты кратковременной неустойчивости $w(t)$.

В частотной области, в соответствии с такими представлениями, математическая модель неустойчивости частоты представляется в виде спектральной плотности мощности [8], [9]

$$f(\Omega) = \sum_{i=-2}^2 \alpha_i \cdot \Omega^i, \quad (1.9)$$

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

Для оценки влияния неустойчивостей частоты стандартов используют характеристики смещенности $M \{ \Delta f \}$ в виде математического ожидания и характеристика разброса (мера неустойчивости, см. п. 1.3) [9].

Математическое ожидание $M \{ \Delta f \}$ удовлетворяет дифференциальному уравнению (1.5).

Разброс значений частоты зависит от ряда факторов. Эти факторы по-разному проявляются для наземных и бортовых частот.

1.2.2 Наземные часы

Приемники навигационных сигналов, выполняющие траекторные измерения в составе беззапросных измерительных станций (БИС) [12], используют в качестве опорных сигналов — гармонические сигналы частотой 5 МГц и после-

довательности секундных импульсов – сигнал 1 PPS, согласованных со шкалой времени ЦС. Эти сигналы генерируются квантовыми стандартами частоты. Стабильность характеристик таких часов обеспечивается созданием специальных условий в месте их установки (стабилизация температурно-влажностных режимов, исключение вибраций и влияния магнитных полей), а также возможностью синхронизации с часами Центрального синхронизатора ГНСС [1].

Ресивер потребителя имеет собственные часы $T_R(t)$ на основе кварцевого генератора, которые обладают нестабильностью частоты не хуже 1×10^{-10} на суточном интервале (таблица 1.1). Для выполнения КВО с высоким уровнем точности ресивер синхронизируется со шкалой времени, построенной на основе КСЧ с высокостабильными метрологическими характеристиками.

Таблица 1.1 – Характеристики современных стандартов частоты [13]

| Тип стандарта частоты | Резонатор | Неопределенность шкалы | Нестабильность частоты (1 сутки) |
|-----------------------------|--|------------------------|----------------------------------|
| Кварцевый генератор | Кристалл кварца | 10 мкс | 1×10^{-10} |
| Рубидиевый стандарт частоты | Атом ^{87}Rb (6,834,682,608 Гц) | 100 нс | 1×10^{-12} |
| Цезиевый стандарт частоты | Атом ^{133}Cs (9,192,631,770 Гц) | 1 нс | 1×10^{-14} |
| Водородный стандарт частоты | Атом H (1,420,405,752 Гц) | 1 нс | 1×10^{-14} |
| Цезиевый фонтан | Атом ^{133}Cs (9,192,631,770 Гц) | 100 пс | 1×10^{-15} |

В качестве эталонов единиц времени, частоты и шкалы времени [14] как правило выступает группа хранителей времени с опорным водородным стандартом, обладающего наибольшей стабильностью частоты. Необходимость объединения часов в группу продиктована растущими требованиями к согласованности шкал времени часов, участвующих в измерениях. В качестве таких групп часов строятся эталонные комплексы единиц времени, частоты и шкалы времени сегмента фундаментального обеспечения ГНСС ГЛОНАСС, часы БИС, участвующие

щих в траекторных измерениях для целей формирования эфемеридно-временного обеспечения ГЛОНАСС. Для минимизации влияния внешних воздействий группу хранителей времени размещают в специально оборудованных помещениях.

В тех случаях, когда ресивер потребителя с часами на основе стандарта КСЧ устанавливается на высокодинамичном объекте [2] или испытывает изменения уровня гравитационного потенциала (такой эксперимент описан в п. 4.3, частота применяемого стандарта изменится [15], [16]).

1.2.3 Бортовые часы

На борту навигационных спутников ГЛОНАСС функционируют цезиевые стандарты частоты, имеющие нестабильность 1×10^{-14} в сутки (таблица 1.1) [17]. Для компенсации уходов таких часов в наземном комплексе управления (НКУ) рассчитываются прогнозные аналитические шкалы времени часов и закладываются на борт навигационного спутника (НС). Прогнозы формируются на основе упрощенной математической модели нестабильности частоты полиномиального вида. Параметры этой упрощенной математической модели называются частотно-временными поправками и связаны с параметрами долговременной нестабильности (п. 2.1).

Частота бортового стандарта, формирующего бортовую шкалу времени $T_S(t)$, изменяется не только в силу причин, порождаемых собственную нестабильность частоты $s(t)$, но испытывает дополнительные изменения под влиянием факторов релятивистского и гравитационного происхождения [11], [15], [18].

Релятивистские эффекты проявляется в возмущениях, влияющих на точность измерения геометрических дальностей от спутника до ресивера потребителя (что в конечном счете сказывается на точности оценивания параметров нестабильности бортовых часов), а также в факторах, непосредственно воздействующих на частоту стандарта. Факторы второй группы $F_{rel}(t)$ в уравнении (1.6) должны быть учтены в математической модели нестабильности бортовых часов, путем введения в эту модель дополнительных составляющих.

В таблице 1.2 приведены уровни относительного изменения частоты Δf и уходов шкал времени бортовых часов ΔT_S от факторов релятивистской и гравитационной природы [11], [15].

Таблица 1.2 — Значения влияния релятивистских и гравитационных эффектов на положение шкалы времени ΔT_S и смещение частоты Δf навигационных спутников

| № | Эффект | Δf | ΔT_S |
|---|---------------------------------------|-----------------------|--------------|
| 1 | Гравитационный сдвиг частоты [6] | $4,7 \cdot 10^{-10}$ | 36 нс |
| 2 | Вторая зональная гармоника [10] | - | 9,49 нс |
| 3 | Смещение орбиты НС [11] | $1,88 \cdot 10^{-13}$ | 23 нс |
| 4 | Возмущения из-за Солнца и Луны [11] | - | 10 пс |
| 5 | Тонкие релятивистские эффекты [6, 11] | - | 0,03 нс |

В соответствии с приведенными значениями таблицы 1.2, наибольшее влияние на функционирование бортовых часов спутников оказывают неоднородность гравитационного поля Земли и его несферичность, учитываемая второй зональной гармоникой в разложении гравитационного потенциала Земли по сферическим функциям [15].

Необходимость учета влияния этих эффектов в ГНСС при обработке результатов измерений обусловлена тем, что уровень этих погрешностей соизмерим с погрешностями задания характеристик эфемеридно-временной информации ГНСС.

По характеру проявления гравитационного влияния на частоту бортовых часов следует отнести к составляющей долговременной нестабильности. Основная составляющая смещения частоты стандарта бортовых часов, связанная с изменением уровня гравитационного потенциала Земли по сравнению с наземными часами, компенсируется на Земле путем введения составляющей поправки на частоту [1].

Следует заметить, что в аналогичных условиях изменения гравитации потенциала в месте нахождения часов могут находиться часы потребителя. Это ил-

люстрируется результатом эксперимента [16], в котором при изменении уровня гравитационного потенциала Земли в связи с перемещением стандарта частоты Ч1-1006 на высоту около 830 м, наблюдалось относительное изменение частоты генератора на величину порядка $7,964 \cdot 10^{-14}$ [19].

Проявления влияния тонких релятивистских и гравитационных эффектов на ход бортовых часов (в таблице 1.2, п. №5), связанные с движением в гравитационных полях НС. Сюда относятся эффекты увлечения инерциальных систем отсчета гравитационными полями движущихся тел (эффект Лензе-Тирринга), эффект изменения направления оси вращающегося тела, движущегося в искривлённом пространстве-времени (эффект де Ситтера), влияние лунно-солнечных возмущений пренебрежительно малы. Суммарное влияние этих составляющих оценивается величиной, не превосходящей 0,03 нс, и в настоящее время определение влияния тонких релятивистских эффектов затруднено ограничением в точности траекторных измерений [11].

Исследование влияния факторов релятивистского типа на частоту бортовых часов является перспективным направлением. На сегодняшний день погрешности релятивистской природы имеют уровень порядка 10 нс и оказывают влияние на результаты измерений КВО. Для будущих поколений спутников ГНСС, которые будут оснащены более точными и стабильными стандартами частоты, необходимо обеспечить более полный и точный алгоритм расчета прогнозирования параметров нестабильности часов.

1.3 Меры нестабильности часов: долговременная и кратковременная составляющие нестабильности

Основная сложность в задаче описания нестабильности связана с многообразием параметров нестабильности частоты и соответствующим им мерам.

Различают следующие виды изменения частоты КСЧ [9], [20], [21], [22]:

— систематические (называют дрейфами, уходами и относят к долговременной нестабильности частоты);

— случайные изменения частоты, которые по характеру относятся к кратковременным нестабильностям частоты;

— детерминированные периодические, вызванные релятивистскими и гравитационными воздействиями.

Долговременная нестабильность частоты $s(t)$ в уравнении (1.6) вызывает систематические изменения частоты КСЧ. Как правило, составляющая $s(t)$ является основной причиной отклонения от истинного значения времени и частоты на определенном интервале времени [23]. К долговременной нестабильности относят дрейф частоты, вызванный чувствительностью компонентов КСЧ к окружающей среде, а также изменением нагрузки и напряжения питания [8], [24], старение генератора, вызванное изменениями в функционировании его компонентов либо в резонансном блоке и в сопроводительной электронной аппаратуре.

Наиболее подходящим способом для определения величины долговременной нестабильности частоты является расчет среднего арифметического значения или значения дрейфа частоты с помощью метода наименьших квадратов (МНК). О параметрической идентификации долговременной нестабильности частоты изложено в п. 2.1.

Кратковременную нестабильность частоты $w(t)$ в уравнении (1.6) представляют в виде шума и характеризуют параметрами разброса относительно некоторых средних значений частоты [25]. Кратковременная нестабильность является результатом собственных шумов компонентов генератора. Подобные изменения частоты выражают в частотной области степенными законом распределения спектральной плотности мощности процесса (уравнение (1.9)). Подробнее об описании параметров кратковременной составляющей нестабильности приведено в п. 2.2.

Следуя уравнению (1.9) дисперсия такого процесса будет неограниченно возрастающей от частоты из-за наличия членов α_{-2}/Ω^2 и α_{-1}/Ω . Это не позволяет использовать для оценивания нестабильности частоты традиционные для математической статистики меры разброса – дисперсию и СКО [13]. По этой причине в качестве меры нестабильности частоты во временной области принята и используется дисперсия Аллана $\sigma_y(\tau)$ [26], [9], [27], [25]. Также в зависимости от поставленной задачи, условий проведения измерений и типа КСЧ используют различные виды вариаций, имеющие более сложные процедуры оценивания и оперирующие большими объемами информации [28], [29]. Подробное описание характеристик существующих мер нестабильности КСЧ приведено в Приложении А.

Детерминированные изменения частоты $F_{rel}(t)$ из уравнения 1.5 связаны с эффектами релятивистской и гравитационной природы, влияющим на значение частоты КСЧ.

Изменения частоты $F_{rel}(t)$ имеют периодический характер, который главным образом зависит от параметров орбиты НС, в равной степени соответствует общим и специальным релятивистским эффектам (отклонение высоты и скорости спутника от средних значений) [15].

Оценка характеристик $F_{rel}(t)$ приведено в п. 2.1.

1.4 Исходная информация для оценивания параметров нестабильности бортовых часов

1.4.1 Уравнения кодовых и фазовых измерений

Информация о текущем положении шкал времени бортовых часов $\Delta T_S(t)$ и параметрах нестабильности бортовых часов извлекается из результатов беззапросных траекторных измерений, выполняемых с сети беззапросных измерительных станций (БИС) с помощью прецизионной аппаратуры приема навигационных радиосигналов ГНСС. Станции оснащены высокостабильными часами, шкалы времени которых согласованы со шкалой Центрального синхронизатора ГНСС. Антенные модули этой приемной аппаратуры устанавливаются на пунктах с известными координатами в принятой системе координат [30].

Уравнения псевдодальномерных измерений связывают геометрические дальности и оказываемые на их значения возмущения при распространении радиосигнала

$$D(t) = \rho(\mathbf{u}_S(t), \mathbf{u}_R(t)) + (\Delta T_S(t) + \Delta T_R(t)) \cdot c + \tau_{ion}(t) \cdot c + \tau_{trop}(t) \cdot c + \sum_{i=1}^n q_{Di}(t) \quad (1.10)$$

$$\varphi(t) = \rho(\mathbf{u}_S(t), \mathbf{u}_R(t)) + (\Delta T_S(t) + \Delta T_R(t)) \cdot c - \tau_{ion}(t) \cdot c + \tau_{trop}(t) \cdot c + K \cdot \lambda + \sum_{i=1}^n q_{\varphi i}(t) \quad (1.11)$$

где $D(t)$ и $\varphi(t)$ - измеренные на момент прихода навигационного сигнала на приемную антенну кодовые и фазовые псевдодальности, выраженные в единицах

длины;

$$\rho(\mathbf{u}_S(t), \mathbf{u}_R(t)) = \sqrt{(x_S(t) - x_R(t))^2 + (y_S(t) - y_R(t))^2 + (z_S(t) - z_R(t))^2} \quad (1.12)$$

— геометрическая дальность от передающей антенны спутника до приемной антенны потребителя;

$\Delta T_S(t) + \Delta T_R(t)$ - суммарное расхождение бортовой $\Delta T_S(t)$ и наземной $\Delta T_R(t)$ шкал относительно системного времени;

c - скорость распространения навигационного радиосигнала в вакууме;

$\tau_{ion}(t)$ - задержка навигационного радиосигнала в ионосферном слое;

$\tau_{trop}(t)$ - задержка навигационного радиосигнала в тропосферном слое;

K - целое неопределённое число длин волн, укладываемых в измеренном расстоянии,

λ - длина волны несущей с литерной частотой, на которой передаётся навигационный радиосигнал;

$q_{Di}(t), q_{\varphi i}(t)$ - влияющие на точность кодовых и фазовых измерений факторы, в число которых включают:

$q_{D1}(t), q_{\varphi 1}(t)$ - смещение фазового центра передающей антенны относительно центра масс НС;

$q_{D2}(t), q_{\varphi 2}(t)$ - смещение фазового центра приёмной антенны относительно её геометрического центра;

$q_{D3}(t), q_{\varphi 3}(t)$ - погрешности, обусловленные эффектами гравитационной и релятивистской природы;

$q_{D4}(t), q_{\varphi 4}(t)$ - погрешности от многолучевости распространения навигационного радиосигнала и от разрывов в данных кодовых измерений;

$q_{D5}(t), q_{\varphi 5}(t)$ - погрешности приведения измеренных дальностей к моменту прихода навигационного сигнала на приемную антенну;

$q_{D6}(t), q_{\varphi 6}(t)$ - погрешности приведения координат потребителя в инерциальную систему координат, в которой описывается движение НС, а также погрешности задания эфемерид навигационного спутника;

$q_{D7}(t), q_{\varphi 7}(t)$ - погрешности случайной природы, включающие шумы измерений, неучтенные задержки в измерительных каналах, для ГЛОНАСС – некомпенсированные межлитерные задержки [31].

1.4.2 Оценивание шкал времени

1.4.2.1 Для оценивания текущих значений шкал времени бортовых часов $\Delta T_S(t)$ или параметров долговременной нестабильности этих часов необходимо скомпенсировать в измеренных псевдодальностях $D(t)$ и $\varphi(t)$ все составляющие, не несущие информации о положении шкалы времени бортовых часов:

- геометрическую дальность $\rho(\mathbf{u}_S(t), \mathbf{u}_R(t))$,
- уходы шкалы времени наземных часов $\Delta T_R(t)$,
- задержки навигационного сигнала в ионосферном и тропосферном слоях атмосферы $\tau_{ion}(t)$ и $\tau_{trop}(t)$,
- релятивистские эффекты $q_{D3}(t), q_{\varphi3}(t)$, связанные с движением спутника по орбите,
- неоднозначность фазовых измерений $K \cdot \lambda$,
- приливные деформации (деформация твердого тела Земли, океанические приливы, полюсные приливы),
- смещения и вариации фазовых центров антенн спутников и приемной аппаратуры $q_{D1}(t), q_{\varphi1}(t), q_{D2}(t), q_{\varphi2}(t)$.

Компенсация перечисленных факторов производится путем оценивания параметров $\hat{\rho}(\mathbf{u}_S(t), \mathbf{u}_R(t))$, $\Delta \hat{T}_R(t)$, $\hat{\tau}_{ion}$ и $\hat{\tau}_{trop}$ с помощью соответствующих математических моделей, описанных в п. 1.4.2.2. Полученные оценки вводятся с противоположным знаком в левые части уравнений измерений (1.10) и (1.11).

1.4.2.2 Для расчета оценки геометрической дальности $\hat{\rho}(\mathbf{u}_S(t), \mathbf{u}_R(t))$, в соответствии с уравнением (1.12), на каждый момент измерений $D(t_k), \varphi(t_k)$ необходимо выполнить пересчет эфемерид с заданным моментом времени в навигационном кадре.

Путем численного интегрирования уравнения движения спутника [1] рассчитать положение спутника на орбите для моментов измерений t_k .

$$\frac{dx_S}{dt_k} = V_{xS};$$

$$\frac{dy_S}{dt_k} = V_{yS};$$

$$\frac{dz_S}{dt_k} = V_{zS};$$

$$\begin{aligned}\frac{dV_{xS}}{dt_k} &= -\frac{GM}{r^3}x_S - \frac{3}{2}J_2\frac{GMa_e^2}{r^5}x_S \cdot \left(1 - \frac{5z_S^2}{r^2}\right) + \omega^2x + 2\omega \cdot V_{xS} + \ddot{x}_S; \\ \frac{dV_{yS}}{dt_k} &= -\frac{GM}{r^3}y_S - \frac{3}{2}J_2\frac{GMa_e^2}{r^5}y_S \cdot \left(1 - \frac{5z_S^2}{r^2}\right) + \omega^2x_S - 2\omega \cdot V_{yS} + \ddot{y}_S; \\ \frac{dV_{zS}}{dt_k} &= -\frac{GM}{r^3}z - \frac{3}{2}J_2\frac{GMa_e^2}{r^5}z_S \cdot \left(3 - \frac{5z_S^2}{r^2}\right) + \ddot{z}_S.\end{aligned}$$

где GM — геоцентрическая константа гравитационного поля Земли;

$r = \sqrt{x_S^2 + y_S^2 + z_S^2}$ — радиус орбиты НС;

a_e — экваториальный радиус Земли;

J_2 — вторая зональная гармоника разложения геопотенциала Земли по сферическим функциям;

ω — угловая скорость вращения Земли.

В качестве начальных условий для интегрирования уравнения (1.12) выбираются значения бортовых эфемерид и составляющие вектора скорости спутника для моментов t_b , следующих с интервалом $t_{b+1} - t_b = 30$ минут.

На базе пункта Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ) ФГУП «СНИИМ» осуществляется расчет на основе интегрирования уравнения движения НС численным методом Эверхарда. Выбор метода позволяет выполнять вычислительные операции за оптимальный период расчета и результатами расчета параметров движения НС с высоким уровнем точности [32].

1.4.2.3 Необходимо также учитывать изменение координат потребителя $\mathbf{u}_R^T(t_k) = (x_R(t), y_R(t), z_R(t))$, происходящее вследствие поворота Земли на угол $1''$ за время распространения радиосигнала τ_S , необходимое для прохождения навигационного сигнала от НС до потребителя. Эти координаты получаются на основе матричных преобразований [31]

$$\mathbf{u}_R(t_k) = A \cdot \mathbf{u}_R(t_b) = \begin{bmatrix} \cos(\omega\tau_S) & \sin(\omega\tau_S) & 0 \\ -\sin(\omega\tau_S) & \cos(\omega\tau_S) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u}_R(t_b)$$

где A — матрица преобразования, с помощью которой происходит коррекция априорно известных координат в СК ПЗ 90.11 [33] антенного модуля потребителя $\mathbf{u}_S(t_b)$ поправкой с учетом поворота Земли при угловой скорости вращения ω за время прохождения радиосигнала τ_S .

1.4.2.4 Для каждого момента времени измерений t_k на основе уравнения (1.12) рассчитывается оценка геометрической дальности

$$\hat{\rho}[\mathbf{u}_S(t_k), \mathbf{u}_R(t_k)] = \sqrt{(x_S(t_k) - x_R(t_k))^2 + (y_S(t_k) - y_R(t_k))^2 + (z_S(t_k) - z_R(t_k))^2}$$

1.4.2.5 Компенсация влияния уходов часов потребителя $\Delta T_R(t)$ для оценивания уходов бортовых часов $\Delta T_S(t)$ может быть решена введением параметра $\Delta T_R(t)$ в разряд оцениваемых параметров.

В настоящей работе величина ухода часов аппаратуры потребителя оказывает минимально возможной поскольку в качестве опорной шкалы времени потребителя используются сигналы шкалы времени Государственного эталона времени и частоты ВЭТ 1-19 метрологического пункта (государственной службы времени и частоты) ГСВЧ ФГУП «СНИИМ».

1.4.2.6 Компенсация влияния ионосферной задержки τ_{ion} обеспечивается использованием ионосферносвободных комбинаций кодовых и фазовых псевдодальномерных измерений, выполненных в двух частотных диапазонах $L1$ и $L2$ [31], [34], [35]

$$\varphi = \frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \cdot \varphi_{L1} - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \cdot \varphi_{L2},$$

$$D = \frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \cdot D_{L1} - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \cdot D_{L2}.$$

Подобный метод устранения влияния ионосферной среды в результатах КВО сводит к минимуму значения погрешности τ_{ion} .

1.4.2.7 Тропосферная задержка τ_{trop} зависит от состояния атмосферы (температура воздуха, давление, влажность) в наземном пункте установки ресивера и имеет сложную неоднородную структуру в общем виде [31], [35]

$$\tau_{trop} \cdot c = m_d(t) \cdot \tau_d + m_w(t) \cdot \tau_w,$$

где $m_d(t)$, $m_w(t)$ — функции отображения для сухого и влажного компонентов; τ_d, τ_w — тропосферные задержки радиосигнала в зенитном направлении для сухого и влажного компонентов. Существует множество математических моделей для описания тропосферной задержки радиосигнала [30].

Для решения поставленных задач компенсация влияния тропосферной задержки радиосигнала τ_{trop} на точность оценивания $\Delta T_{Si}(t)$ осуществляется

путем применения соответствующих поправок математической модели Global Mapping Funktion (GMF) [30].

1.4.2.8 Погрешность $q_3(t)$ обусловлена влиянием эффектов гравитационной и релятивистской природы. Из-за движения НС в пространстве с разным уровнем гравитационного потенциала $q_3(t)$ влияет на параметры орбиты и учитывается при предварительной обработке дальномерных измерений путем вычислений оценок в соответствии с выражением [8]

$$q_3(t) = \frac{2GM}{c^2} \ln \frac{\|\mathbf{u}_S(t)\| + \|\mathbf{u}_R(t)\| + \rho(\mathbf{u}_S(t), \mathbf{u}_R(t))}{\|\mathbf{u}_S(t)\| + \|\mathbf{u}_R(t)\| - \rho(\mathbf{u}_S(t), \mathbf{u}_R(t))}.$$

1.4.2.9 Разрешение фазовой неоднозначности представляется главной задачей при использовании фазовых псевдодальномерных измерений [36]. В настоящее время нет универсального алгоритма по разрешению неоднозначности [37].

В работе применяется оригинальная фильтрация данных и способ разрешения неоднозначности, основанный на расчете широкополосной и узкополосной комбинационных частот [38].

1.4.2.10 Компенсация смещения и вариаций фазовых центров антенн приемника и НС, приливные деформации твердого тела Земли, океанические приливы, полюсные приливы принято решать с использованием математических моделей, описанных в соглашении [30].

1.4.3 Оценивание частот

Определение моментов шкал времени часов осуществляется на основе разности фазовых измерений (1.11) на момент измерений t_k

$$\Delta T_S(t_k) \cdot c = \varphi(t_k) - \rho(t_k) - \Delta T_R(t_k) \cdot c + \tau_{ion}(t_k) \cdot c - \tau_{trop}(t_k) \cdot c - K \cdot \lambda - \sum_{j=1} \hat{q}_\varphi(t_k).$$

Для высокоточного оценивания параметра $\hat{s}(t_k)$ из уравнения неустойчивости частоты (1.6) целесообразно использовать разность фазовых измерений на интервале времени проведения измерений $[t_k; t_{k+1}]$

$$\begin{aligned} \varphi(t_{k+1}) - \varphi(t_k) = & [\rho(t_{k+1}) - \rho(t_k)] + [\Delta T_S(t_{k+1}) - \Delta T_S(t_k)] \cdot c + \\ & + [\Delta T_R(t_{k+1}) - \Delta T_R(t_k)] \cdot c - [\tau_{ion}(t_{k+1}) - \tau_{ion}(t_k)] \cdot c + \\ & + [\tau_{trop}(t_{k+1}) - \tau_{trop}(t_k)] \cdot c + \sum_{j=1} [q_\varphi(t_{k+1}) - q_\varphi(t_k)]. \end{aligned} \quad (1.13)$$

Результаты оценки уходов бортовых шкал времени из уравнения (1.13) выполняются при соблюдении следующих условий:

— разность геометрических дальностей $[\rho(t_{k+1}) - \rho(t_k)]$ на интервале времени $[t_k; t_{k+1}]$ оценивается путем привлечения высокоточных эфемерид НС, рассчитанных численным методом Эверхарда в пункте ГСВЧ ФГУП «СНИИМ», и координат антенны ресивера, определенных с высокой точностью (п. 1.4.2);

— уходы часов ресивера $[\Delta T_R(t_{k+1}) - \Delta T_R(t_k)]$ определяются путем синхронизации его шкалы времени со шкалой государственного вторичного эталона времени и частоты ВЭТ 1-19;

— компонента $[\tau_{ion}(t_{k+1}) - \tau_{ion}(t_k)]$, порожденная при прохождении радиосигнала ионосферы, устраняется с помощью ионосферно-свободной составляющей (п. 1.4.2).

1.5 Основные задачи спутниковых навигационных технологий, приводящие к оцениванию параметров нестабильности часов

Существует ряд информационно-измерительных систем, имеющих в своём составе высокостабильные часы, для которых требуется высокая согласованность моментов шкал времени. Это системы, в которых измерения дальностей сводятся к согласованным измерениям интервалов времени, и системы фиксации синхронно развивающихся процессов.

К обозначенному типу информационно-измерительных систем относятся:

- эталонные комплексы хранения и воспроизведения единиц времени, частоты и шкалы времени Государственной службы времени и частоты и системы единого времени [39];

- сети беззапросных измерительных систем (БИС) космического комплекса ГЛОНАСС [12];

- орбитальные группировки навигационных спутников ГЛОНАСС, оснащённых бортовыми часами и бортовой аппаратурой межспутниковых измерений [40];

- большой ряд радионавигационных систем наземного базирования;

- комплексы аппаратуры в области космической геодезии.

Перечисленные информационно-измерительные системы, локальные и пространственно распределённые, отличаются типами применяемых в их составе часов. Поэтому выделены задачи, приводящие к оцениванию параметров нестабильности часов систем, требующее рассчитать с помощью идентифицированных математических моделей нестабильностей компенсирующие поправки к уходам часов относительно эталонных шкал, а также строить прогнозные значения для описания.

1. Передача эталонной единицы времени и частоты с помощью навигационных радиосигналов ГНСС вторичным эталонам времени, размещенным в пунктах ГСВЧ.
2. Синхронизация пространственно-разнесенных часов БИС для обеспечения и поддержания работы сети этих приемников в единой шкале времени Центрального синхронизатора системы;
3. Оценивание и прогнозирование навигационных параметров НС в сегменте эфемеридно-временного обеспечения (ЭВО) ГНСС.
4. Определение эффектов от влияния гравитационного поля Земли и других массивных тел Солнечной системы в области комической геодезии и дистанционного зондирования.

Решение перечисленных задач осуществляется при условии оценки параметров нестабильности часов, участвующих в ГНСС-измерениях. К точности и надёжности результатов предъявляются высокие требования, обеспечение которых видится в различных алгоритмических подходах в рамках контроля бортовых часов НС, изложенных в п. 1.6.

1.6 Пути повышения точности и достоверности результатов контроля бортовых шкал. Развитие орбитального метода

В последние годы сегмент ЭВО ГЛОНАСС, отвечающий за передачу и хранение единиц времени, частоты и шкалы времени часов, функционирующих на борту НС, подверглась значительному аппаратурному переоснащению [41].

Согласно федеральной целевой программ [42] ведутся работы по совершенствованию бортовых стандартов частоты в части улучшения метрологических характеристик этих стандартов, что позволяет повысить точностные харак-

теристики КВО. На сегодняшний день возможности совершенствования аппаратуры спутниковых навигационных технологий можно считать исчерпанными [43]. Дальнейшее совершенствование аппаратуры требует значительных капиталовложений и длительного времени разработок.

Перспективным направлением дальнейшего совершенствования частотно-временных определений в спутниковых навигационных технологиях представляется привлечение эффективных алгоритмов обработки больших объёмов измерительной информации.

Пути повышения эффективности алгоритмического обеспечения задачи оценивания уходов бортовых шкал времени видятся в следующих направлениях:

- привлечение малозашумленных фазовых измерений (уравнение (1.11)) в качестве исходной информации для КВО, а также дополнительно оценивание неоднозначности этих измерений;

- расчет параметров движения НС ГНСС с помощью численного метода интегрирования Эверхарда [32] с учетом действующих возмущений (неравномерность вращения Земли, радиационное давление Солнца, гравитационное притяжение Луны и Солнца);

- привязка шкалы времени приемника, размещенного в пункте ГСВЧ, к моменту эталонной шкалы государственного вторичного эталона ВЭТ 1-19;

- формирование безионосферной комбинации измерений на частотах $L1$ и $L2$ для исключения погрешности измерений, вызванной задержкой радиосигнала в ионосферном слое атмосферы Земли;

- определение погрешностей измерений, порожденных факторами $q_{\varphi i}(t)$ из уравнения (1.11), путем привлечения современных высокоточных и полных математических моделей, применяемых и рекомендованных службами IGS и IERS, AIUB, ESOC.

Привлечение новых алгоритмов обработки траекторных измерений позволяют обеспечить контроль частотно-временных параметров спутников ГЛОНАСС, проводить высокоточное оценивание уходов и идентификацию параметров нестабильности бортовых часов на базе пункта ГСВЧ ФГУП «СНИИМ», а также строить индивидуальную математическую модель часов НС и рассчитывать на основе этой модели прогнозы на определенные интервалы времени.

1.7 Основные результаты и выводы

1.7.1 Точность и надежность координатно-временных определений, решаемых на основе спутниковых навигационных технологий, непосредственно зависит от качества частотно-временного обеспечения этих технологий. Частотно-временные измерения, выполняемых на основе моментов шкал времени бортовых часов НС и часов наземных приемников, имеют ключевое значение в ГНСС-технологиях. Отклонения значений шкал времени этих часов увеличивают значение погрешности в результатах КВО.

1.7.2 Применяемые упрощенные математические модели уходов шкал времени бортовых часов ЧВП не в полной мере отражают природу уходов этих часов. Поэтому автором предложена уточненная модель, учитывающая не только параметры долговременной нестабильности, но и гравитационные и релятивистские эффекты.

1.7.3 Точность оценивания отклонений моментов шкал времени бортовых часов увеличивается за счет использования в качестве исходных данных результатов фазовых псевдодальномерных измерений, имеющих меньших по сравнению с кодовыми измерениями уровень шумов. При этом задача оценки параметров нестабильности часов НС усложняется в связи с необходимостью дополнительного оценивания фазовой неоднозначности этих измерений.

1.7.4 Для обеспечения высокоточных результатов оценивания параметров нестабильности бортовых часов навигационных спутников привлечения эффективных алгоритмических путей обработки измерительной информации.

1.7.5 Перспективным для сравнения частот пространственно-разнесенных часов является использование метода Precise Point Positioning (PPP), предлагающего использование апостериорной высокоточной эфемеридной информации об орбитах навигационных спутников.

Глава 2. Идентификация нестабильности часов и прогнозирование уходов бортовых часов

2.1 Параметрическая идентификация долговременной нестабильности в классе полиномов. Оценка характеристик релятивистских эффектов

Для описания уходов шкал времени бортовых часов НС $\Delta T_S(t)$ относительно момента шкалы времени Центрального синхронизатора $T_{ЦС}(t)$ принята математическая модель нестабильности [1] в виде дифференциального уравнения (1.6). Долговременная составляющая нестабильности $s(t)$ представляется на интервале времени $[t_k, t_{k+1}]$ линейной комбинацией

$$s(t) = \sum_{i=0}^n \phi_i(t) \cdot a_i + F_{rel}(t), \quad (2.1)$$

где $\phi_i(t)$ — базисные функции, a_i — неизвестные постоянные на интервале времени $[t_k, t_{k+1}]$. Неизвестные коэффициенты a_i подлежат оцениванию.

В качестве базисных функций применены ортогональные полиномы Чебышева [44], для расчета которых применяются следующие выражения

$$\begin{aligned} \phi_0(t) &= 1, \\ \phi_1(t) &= t - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} t_i, \\ \phi_2(t) &= t^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} t_i^2 - \frac{\sum_{i=0}^{N-1} t_i^2 \cdot \phi_1(t_i)}{\sum_{i=0}^{N-1} \phi_1^2(t_i)} \cdot \phi_1(t), t_i \in [t_k; t_{k+1}], \end{aligned}$$

при моментах фиксации t_i N измерений на определенном интервале $[t_k; t_{k+1}]$.

При аппроксимации дискретных значений исследуемого процесса с помощью полиномов Чебышева существует возможность последующего перехода к степенным полиномам. Выражение (2.1) принимает вид степенного полинома

$$s(t) = a_{s0} + a_{s1}(t_{k+1} - t_k) \cdot t + a_{s2} \cdot (t_{k+1} - t_k)^2 + F_{rel}(t), t \in [t_{k+1} - t_k]$$

Таким образом, коэффициенты разложения a_i с помощью приведённого способа пересчитываются в коэффициенты степенных полиномов a_{si} и имеют смысл как

- a_{s0} — смещение шкалы времени,
- a_{s1} — относительное отклонение частоты,
- a_{s2} — дрейф частоты на интервале $[t_k, t_{k+1}]$.

Значения коэффициентов $a_{si}, i = 0, 1, 2$ используются в качестве частотно-временных поправок (ЧВП) к бортовым шкалам времени и транслируются на каждый НС дважды в сутки. Эта информация в составе навигационного радиосигнала поступает к потребителю и используется для компенсации уходов шкал времени бортовых часов НС.

Задача параметрической идентификации долговременной составляющей нестабильности бортовых часов заключается в оценивании коэффициентов a_{si} , которое происходит на основе обработки разности фазовых траекторных измерений (1.13) по обобщенный метод наименьших квадратов (ОМНК).

Релятивистская составляющая F_{rel} нестабильности частоты из уравнения (1.6) вызвана влиянием изменяющегося гравитационного поля Земли. Значения уходов часов

$$\int_{t_k}^{t_{k+1}} F_{rel}(\tau) d\tau = \Delta T_{con} + \Delta T_{\sim} \quad (2.2)$$

имеет две составляющие, где ΔT_{con} - постоянное смещение часов, зависящее от величины главной полуоси орбиты спутника, и равна порядка 37 мкс в сутки [15]; ΔT_{\sim} - периодическое смещение шкалы часов, зависящее от параметров движения спутника (эксцентриситета, угловой аномалии, главной полуоси орбиты).

Подробная формализация для расчета указанных смещений, вызванных релятивистскими и гравитационными эффектами, приведена в Приложении Б.

Проведенный в [18] анализ показывает, что при расчете составляющей F_{rel} присутствует неучтенная периодическая погрешность на уровне 0,1 нс и влияет на положение шкалы времени бортовых часов. В таком случае необходимо дополнить уравнение (2.2) с учетом присутствующих погрешностей

$$\begin{aligned} \Delta T_{rel} &= [\Delta f_{con} + \delta \Delta f_{con}] \cdot t + \Delta T_{\sim} + \delta \Delta T_{\sim} = \\ &= [446,47 \cdot 10^{-12} + \delta \Delta f_{con}] t - 2r \cdot v/c^2 + \delta \Delta T_{\sim} \end{aligned} \quad (2.3)$$

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

$\delta\Delta T_{\sim}$ - периодическая составляющая, порожденная влиянием второй зональной гармоники разложения потенциала Земли по сферическим функциям J_2 .

Значение смещения частоты $\delta\Delta f_{con}$ относится к постоянной части уравнения (2.3) и зависит главным образом от отклонения главной полуоси орбиты НС a от номинального расчетного значения a_n

$$\delta\Delta f_{con} = \frac{3}{2}GM \cdot \frac{(a - a_n)}{(a \cdot c)^2}, \quad (2.4)$$

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

a_n - номинальное значение главной полуоси орбиты спутника.

Для расчета погрешности $\delta\Delta T_{\sim}$, которая имеет периодический характер, получается после аппроксимаций преобразованных уравнений [18], описывающих релятивистские проявления на НС, получено соотношение на основе кеплеровских элементов орбиты

$$\delta\Delta T_{\sim} = -\frac{1}{2} \frac{a_E^2}{a^2 c^2} J_2 \left[3\sqrt{GMa} \sin^2 i \sin 2u - 7 \frac{GM}{a} \left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 i \right) t \right], \quad (2.5)$$

где J_2 - вторая зональная гармоника,

a_E - большая полуось общеземного эллипсоида [33];

c - скорость света;

i и u - отклонение и аргумент широты орбиты НС соответственно,

Выражение (2.5) является аналитическим представлением периодической и дрейфующей релятивистской погрешности (рисунок 2.1), вызванной преимущественно второй зональной гармоникой J_2 , и компенсирует около 90% значения периодической релятивистской погрешности. Также вклад вносят приливные эффекты от гравитационного воздействия Луны и Солнца на движение НС, однако значения таких составляющих оцениваются порядка 10 пс [18]. При существующем уровне точности траекторных измерений компенсация таких значений не представляется необходимой.

Погрешность, порождаемая от влияния второй зональной гармоники J_2 на положение часов, составляет порядка 1 нс на суточном интервале и имеет периодический характер, зависящий от обращения НС вокруг Земли (половина периода обращения составляет ~ 6 ч.) при угле наклона плоскости орбиты 64° (рисунок 2.1).

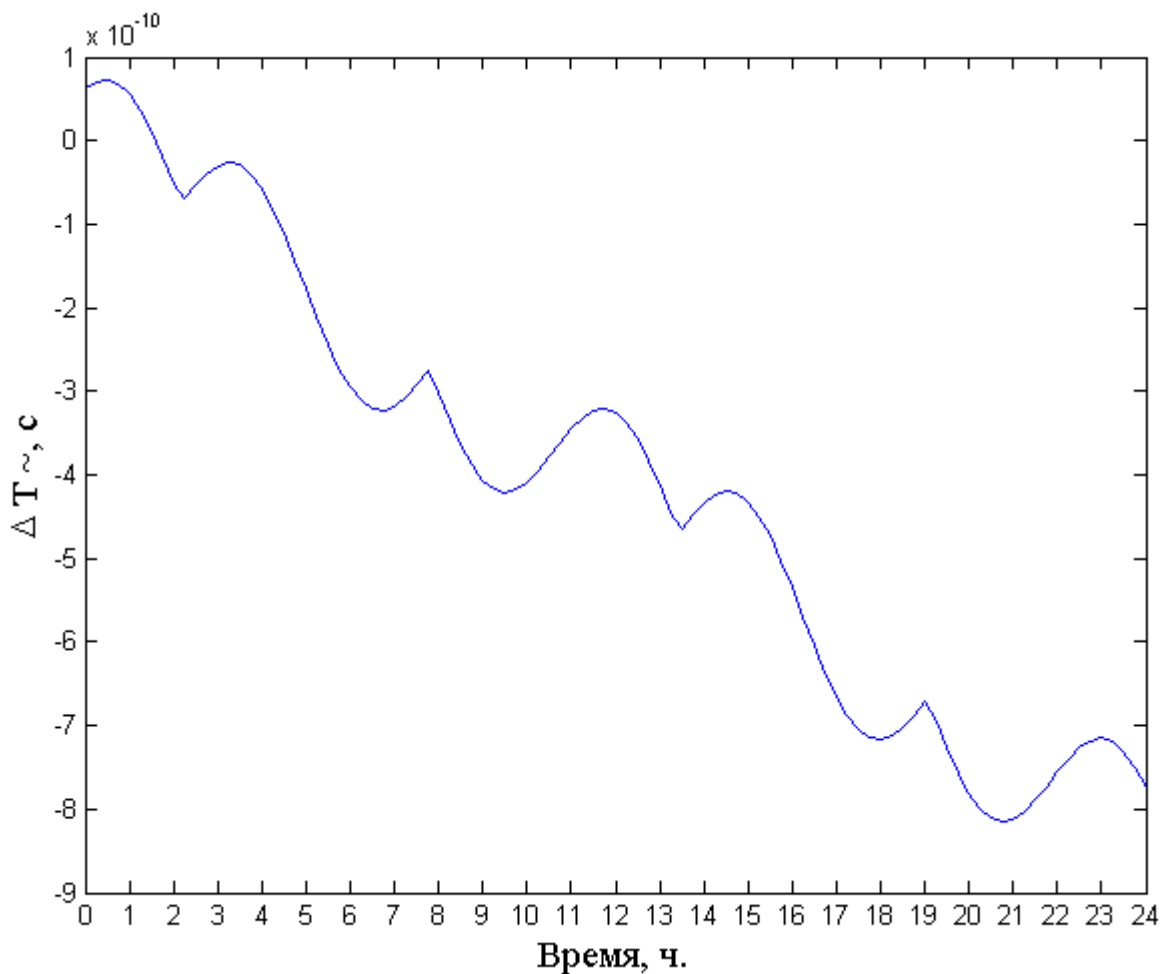


Рисунок 2.1 — Периодическая релятивистская составляющая погрешность, рассчитанная по уравнению (2.5)

Используемые стандартные релятивистские поправки ГЛОНАСС порождают погрешности при расчете ЧВП порядка единиц нс, что влияет на шкалу времени бортовых часов спутников. Рисунок 2.1 иллюстрируют уходы часов НС ГЛОНАСС №735 порядка 1нс с периодом в 6ч., а также дрейф частоты на суточном интервале. В целях повышения точности расчетов ЧВП это является основанием для расчета указанных параметров в составе параметров долговременной нестабильности, особенно при том условии, что будущие спутники ГЛОНАСС оборудуют более стабильными водородными стандартами частоты.

В таблице 2.1 приведены результаты проведенного автором расчета релятивистских погрешностей уходов бортовых часов орбитальной группировки ГЛОНАСС за 21.07.2015. Исходными данными выступали высокоточные параметры орбит движения спутников системы ГЛОНАСС.

Таблица 2.1 — Оцененные параметры орбиты (отклонение главной полуоси орбиты Δa , угол наклона i , эксцентриситет e и отклонения бортовых шкал времени $\delta\Delta f_{con}$ и $\delta\Delta T_{\sim}$ на суточном интервале, вызванные влиянием гравитационных и релятивистских эффектов, для НС орбитальной группировки ГЛОНАСС за 21.07.2015

| № НС | Δa , м | i° | e | $\delta\Delta f_{con}$ | $\delta\Delta T_{\sim}$, с/сутки |
|------|----------------|-----------|----------|------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 31532,86 | 64,13026 | 0,020555 | 3,22E-13 | -3,87E-10 |
| 2 | 28831,16 | 64,60273 | 0,041339 | 2,95E-13 | -4,02E-10 |
| 3 | 27444,7 | 64,43364 | 0,041102 | 2,81E-13 | -3,98E-10 |
| 4 | 30225,14 | 64,45379 | 0,028484 | 3,09E-13 | -3,96E-10 |
| 5 | 31607,48 | 64,11775 | 0,008988 | 3,23E-13 | -3,76E-10 |
| 6 | 28748 | 64,1122 | 0,027037 | 2,94E-13 | -3,78E-10 |
| 7 | 27420,47 | 64,44198 | 0,038505 | 2,80E-13 | -3,88E-10 |
| 8 | 30162,1 | 64,44947 | 0,045475 | 3,08E-13 | -3,91E-10 |
| 9 | 31600,8 | 64,95577 | 0,046468 | 3,23E-13 | -4,15E-10 |
| 10 | 29863,42 | 65,74948 | 0,044037 | 3,05E-13 | -4,44E-10 |
| 11 | 27224,49 | 65,36555 | 0,039518 | 2,78E-13 | -4,30E-10 |
| 12 | 29049,44 | 64,95381 | 0,060814 | 2,97E-13 | -4,16E-10 |
| 13 | 31620,68 | 65,35269 | 0,028136 | 3,23E-13 | -4,22E-10 |
| 14 | 29733,17 | 65,73414 | 0,043476 | 3,04E-13 | -4,35E-10 |
| 15 | 27061,61 | 65,73232 | 0,0444 | 2,77E-13 | -4,35E-10 |
| 16 | 29203,79 | 64,93705 | 0,048532 | 2,99E-13 | -4,06E-10 |
| 17 | 30043,94 | 65,27946 | 0,040354 | 3,07E-13 | -4,21E-10 |
| 18 | 30871,5 | 65,07168 | 0,038473 | 3,16E-13 | -4,21E-10 |
| 19 | 27531,43 | 65,29416 | 0,010548 | 2,82E-13 | -4,27E-10 |
| 20 | 27990,37 | 65,30648 | 0,033977 | 2,86E-13 | -4,30E-10 |
| 21 | 30956,23 | 65,0118 | 0,022955 | 3,16E-13 | -4,13E-10 |
| 22 | 30938,74 | 65,20015 | 0,05382 | 3,16E-13 | -4,14E-10 |
| 23 | 27840,14 | 65,18305 | 0,019191 | 2,85E-13 | -4,16E-10 |
| 24 | 27952,47 | 65,19295 | 0,030934 | 2,86E-13 | -4,14E-10 |

Полученные в соответствии с уравнениями (2.4) и (2.5) результаты показывают, что орбиты НС ГЛОНАСС имеют незначительные отклонения от номинального значения главной полуоси a_n , в отличие от спутников GPS. Влияние отклонения главной полуоси орбиты Δa спутников ГЛОНАСС на положение бортовой шкалы времени из уравнения (2.4) вызывает смещение частоты порядка $0,3 \cdot 10^{-12}$ на суточном интервале оценивания. Влияние второй зональной гармоники J_2 на уходы бортовых стандартов частоты с учетом угла наклона орбиты i порождает в среднем отклонение шкалы времени $\delta\Delta T_{\sim}$ порядка 0.4 нс в сутки (таблица 2.1).

Необходимо отметить, что в уравнениях (2.2) и (2.3) не рассматривается влияние на орбиты возмущений из-за гравитационных воздействий Луны и Солнца, приливного потенциала Земли, а также менее существенные гравитационные члены потенциала Земли за исключением второй зональной гармоники J_2 . Из всех исключенных эффектов, влияние гравитационных воздействий Луны и Солнца вероятно являются самыми значительными на уровне десятков пс. Учет перечисленных гравитационных и релятивистских эффектов является перспективным направлением в будущем развитии точности траекторных измерений ГНСС технологий.

Расчет дополнительных параметров уходов часов из-за влияния гравитационной и релятивистской природы и включение этих параметров в математическую модель нестабильности частоты бортовых часов позволят формировать высокоточную бортовую частотно-временную информацию.

2.2 Параметрическая идентификация кратковременной нестабильности в классе уравнений авторегрессии

Кратковременная составляющая нестабильности частоты $w(t)$ трактуется как выходной сигнал некоторого формирующего фильтра, описывающегося в общем случае линейным дифференциальным уравнением вида [45]

$$\sum_{j=0}^J b_j \cdot w^{(j)}(t) = \xi(t), w^{(j)}(t_0) = 0, j = 0, \dots, J - 1. \quad (2.6)$$

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 (2.6) в виде уравнения авторегрессии

$$w(t_k) = \alpha_1 \cdot w(t_{k-1}) + \alpha_2 \cdot w(t_{k-2}) + \alpha_3 \cdot w(t_{k-3}) + \xi(t_k), \quad (2.7)$$

где α_i - коэффициент, непосредственно связанный с коэффициентами b_i уравнения (2.6).

Алгоритм идентификации параметров α_i кратковременной составляющей нестабильности частоты включает в себя следующие операции:

1. Статистическая обработка результатов траекторных измерений с целью извлечения информации о показаниях бортовых часов на определенном интервале времени.
2. Построение оценок корреляционной функции процесса $w(t)$, которое производится из разности показаний часов $\Delta T(t_{k+1}) - \Delta T(t_k)$, причем из этой разности исключена составляющая долговременной нестабильности часов согласно уравнению (1.7).
3. Параметрическая идентификация кратковременной составляющей нестабильности $w(t)$ сводится к оцениванию параметров α_i авторегрессии (2.6) путем решения уравнения Юла-Уокера [46].

Привлечение модели авторегрессии (2.6) в прогнозировании текущих уходов бортовых часов позволяет рассчитать оптимальный шаг фиксации измерительной информации.

2.3 Прогнозирование уходов бортовых часов на основе математических моделей нестабильности частоты

Применяемые параметры прогнозирования в ГНСС формируются в виде частотно-временных поправок, включающие значения смещения шкалы времени и отклонение частоты бортовых часов [4]. Как обсуждалось в п. 2.1, такие параметры упрощенной математической модели не могут обеспечить качественную компенсацию уходов бортовых часов НС для больших интервалов времени.

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 релятивистской природой $F_{rel}(t)$.

Прогнозирование отклонения часов $\Delta T(t_{k+1})$ представляется простой функцией смещения начального момента времени $\Delta T(t_k)$, смещения частоты и дрейфа частоты $s(t_k)$, а также воздействием 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.

Для расчета бортовых ЧВП используют параметры упрощенной математической модели нестабильности часов полиномиального вида, не привлекая параметры кратковременной нестабильности частоты $w(\tau)$, а также используют простое описание измерений частоты бортового стандарта, вызванное влиянием гравитационной и релятивистской природой. Прогнозируемые аналитические шкалы времени бортовых часов рассчитывается с помощью параметров долговременной составляющей нестабильности частоты, характеризующие смещение шкалы времени и частоты часов. Подобное упрощение математической модели нестабильности частоты КСЧ порождает погрешности [47], вызванные влиянием неучтенных параметров нестабильности частоты, и необходимость решения задачи контроля качества и оценивания точности частотно-временного обеспечения НС системы ГЛОНАСС.

2.4 Оценка точности прогнозных значений уходов бортовых часов

Важной задачей спутниковых навигационных технологий является оценивание уходов бортовых шкал времени относительно системной (эталонной) шкалы времени.

Все псевдодальномерные траекторные измерения в виде интервалов времени, необходимых для прохождения навигационных сигналов от спутника до потребителя, определяются с использованием действительного момента шкалы времени бортовых шкал времени. Однако отсчет измеренных интервалов времени ведется от моментов некоторых аналитических бортовых шкал времени, рассчитанных на основе применения бортовых частотно-временных поправок [48]. При этом расхождения моментов этих аналитических бортовых шкал непосредственно рожают погрешности в результатах траекторных измерений.

Полученные оценки текущих моментов шкал времени бортовых часов $\Delta T_S(t)$ позволили:

- оценивать качество частотно-временных поправок, применяемых для компенсации уходов бортовых шкал времени $\Delta T_S(t)$ от системной шкалы;
- идентифицировать параметры математических моделей нестабильности частоты бортовых стандартов [8], [45], [49] и рассчитывать на основе этих моделей качественные частотно-временные поправки.

В условиях применения аппаратных комплексов эталона времени и частоты ВЭТ 1-19 ФГУП «СНИИМ», когда с достаточной степенью надежности можно считать шкалу времени приемной аппаратуры $T_R(t)$ - эталонной, в ФГУП «СНИИМ» ведутся работы по оцениванию уходов бортовых шкал времени орбитальной группировки спутников ГЛОНАСС относительно шкалы UTC(Nm) на суточном интервале наблюдения.

Анализ реальных данных позволил получить оценки текущих уходов бортовых часов НС системы ГЛОНАСС. На рисунках 2.2 и 2.3 представлены оценки текущих положений бортовых шкал навигационных спутников ГЛОНАСС № 747 и № 734 и соответствующие им аналитические шкалы в виде кусочно-линейных функций, рассчитанные с помощью частотно-временных поправок. Расчеты проводились за радиовидимый интервал времени прохождения НС на за 20.03.2016 в пункте ГСВЧ ФГУП «СНИИМ».

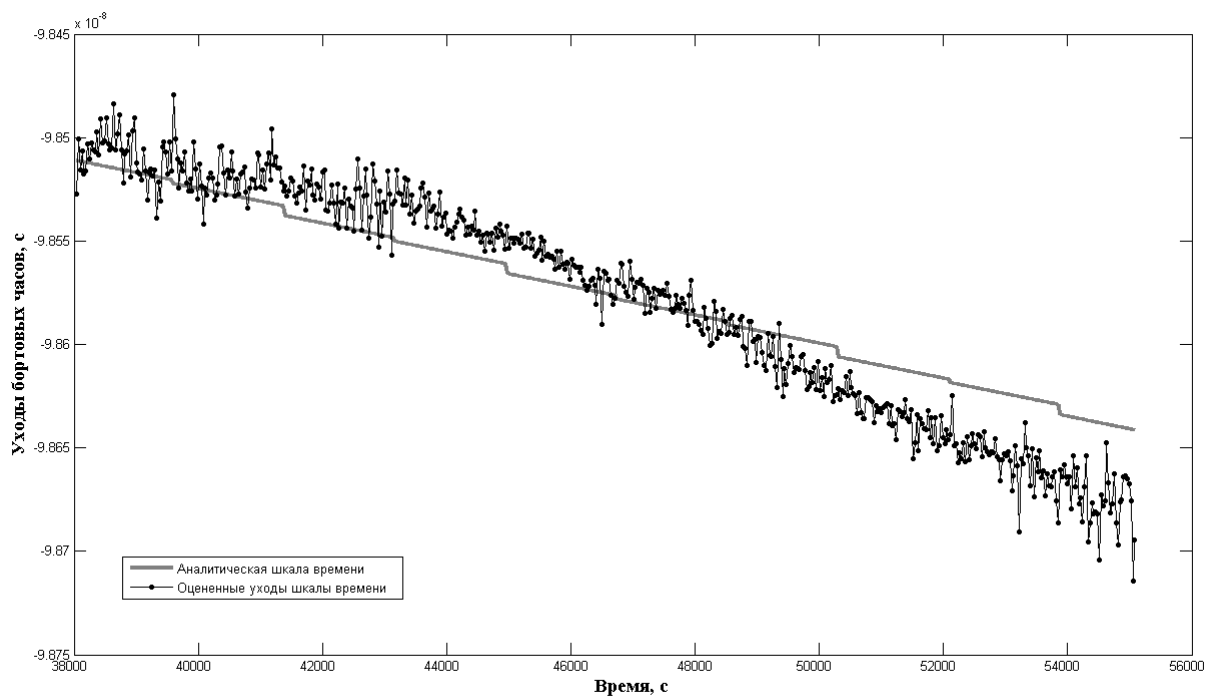


Рисунок 2.2 — Оценка текущих значений моментов бортовой шкалы времени и соответствующей аналитической шкалы НС № 747

На рисунке 2.3 видно, что действительные значения момента шкал времени НС № 734 расходятся с соответствующей аналитической шкалой времени, представленной в виде кусочно-линейной функцией. Рассматриваемый случай говорит об ошибочном оценивании параметров нестабильности бортовых часов НС. Погрешность от уходов бортовых шкал времени. Проведенный сравнительный анализ погрешностей представления бортовых шкал времени соответствующими аналитическими шкалами показал, что в 30 % случаев такие погрешности имеют достаточно высокий уровень.

Оценивание текущих уходов бортовых часов на базе метрологического пункта ГСВЧ ФГУП «СНИИМ» позволяет привлекать также измерения с пунктов ГСВЧ п. Менделеево, г. Иркутск, г. Хабаровск, доступных по <ftp://vniiftri.ru>. Данные этих пунктов обеспечивают решение задачи оценивания бортовых шкал времени НС благодаря функционирующим государственным эталонам времени и частоты.

На рисунках 2.4 и 2.5 в виде диаграмм представлены оценки математических ожиданий и оценки СКО указанных погрешностей. Проиллюстрированные результаты получены по данным беззапросных кодовых траекторных измерений стандартной точности в соответствии с регламентом ГСВЧ.

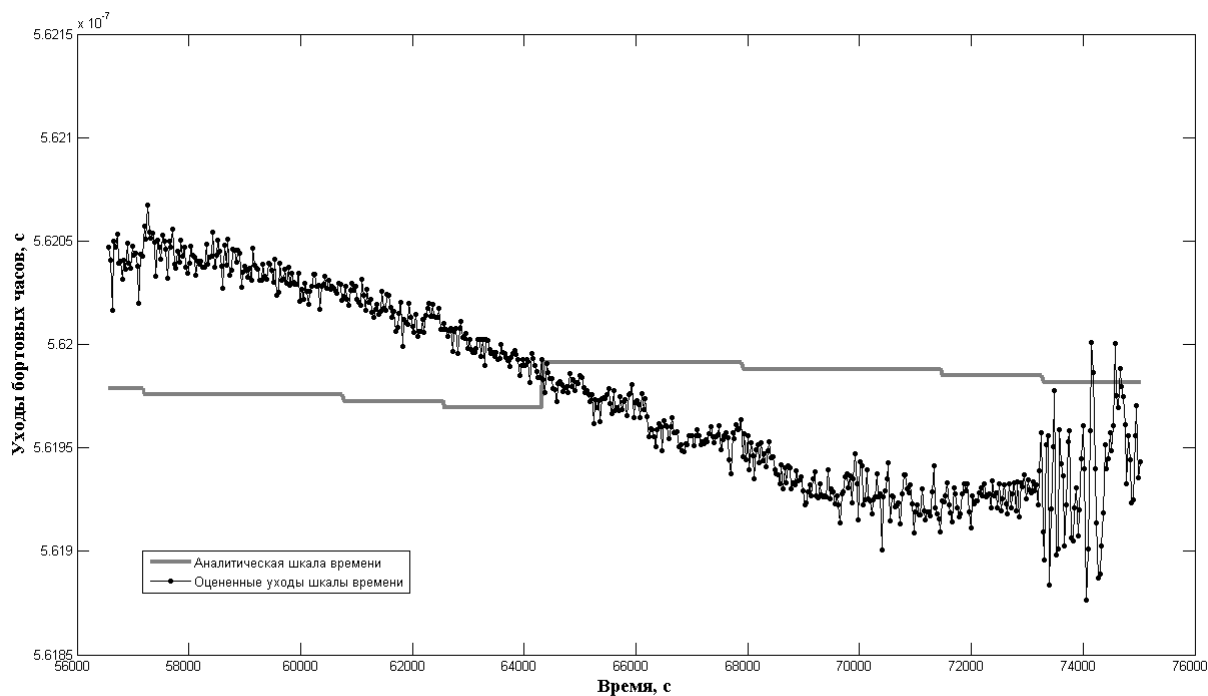


Рисунок 2.3 — Оценка текущих значений моментов бортовой шкалы времени и соответствующей аналитической шкалы НС № 734

Необходимо отметить, что результаты оценивания погрешностей представления бортовых шкал времени, полученные в условиях применения эталона ВЭТ 1-19, хорошо согласуются с аналогичными оценками таких погрешностей, приведенных в бюллетенях системы высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП) [50], [51].

Полученная автором измерительная информация применяется для обеспечения функционирования региональной сети базовых ГНСС-станций Новосибирской области [52] в целях повышения качества навигационных услуг, предоставляемых потребителю.

Повышение точности и достоверности оценивания бортовых шкал времени может быть достигнуто за счет использования в качестве исходных данных результатов фазовых псевдодальномерных измерений. В этом случае возникает дополнительная проблема оценивания неоднозначности фазовых измерений $N \cdot \lambda$ в уравнении (1.11).

Существенное повышение точности оценивания уходов бортовых шкал обеспечит привлечение дополнительных межспутниковых псевдодальномерных измерений и уравнивания полученных оценок $\Delta \hat{T}_{S_i}(t)$ по ансамблю бортовых часов [12].

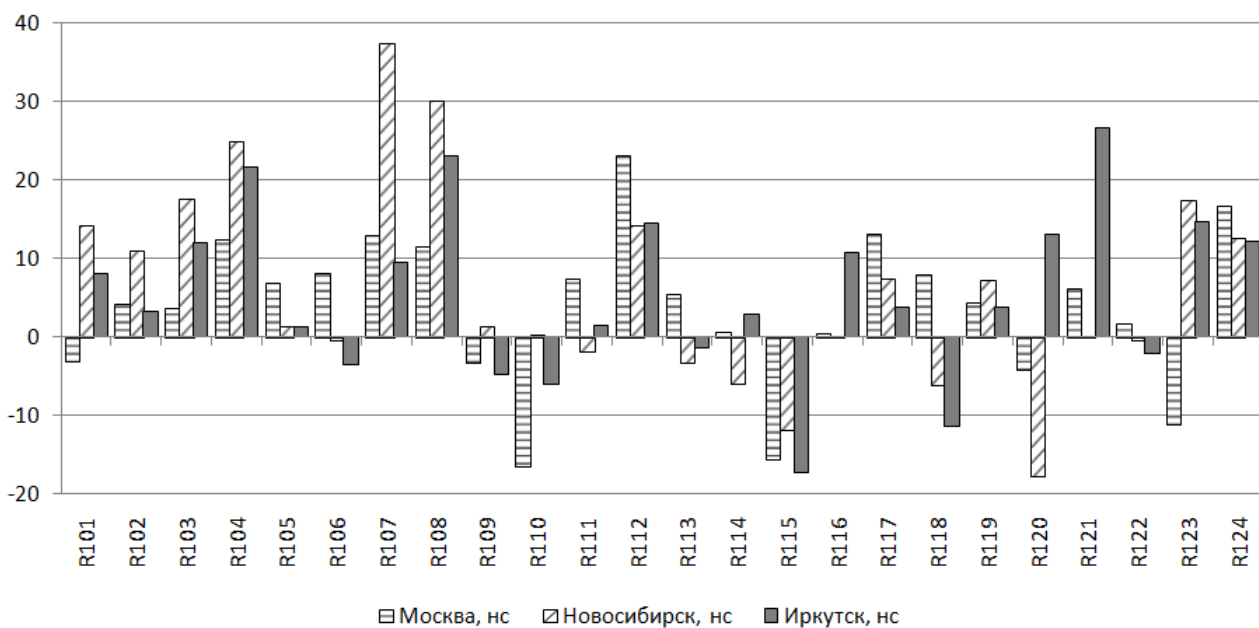


Рисунок 2.4 – Математические ожидания погрешностей частотно-временных поправок

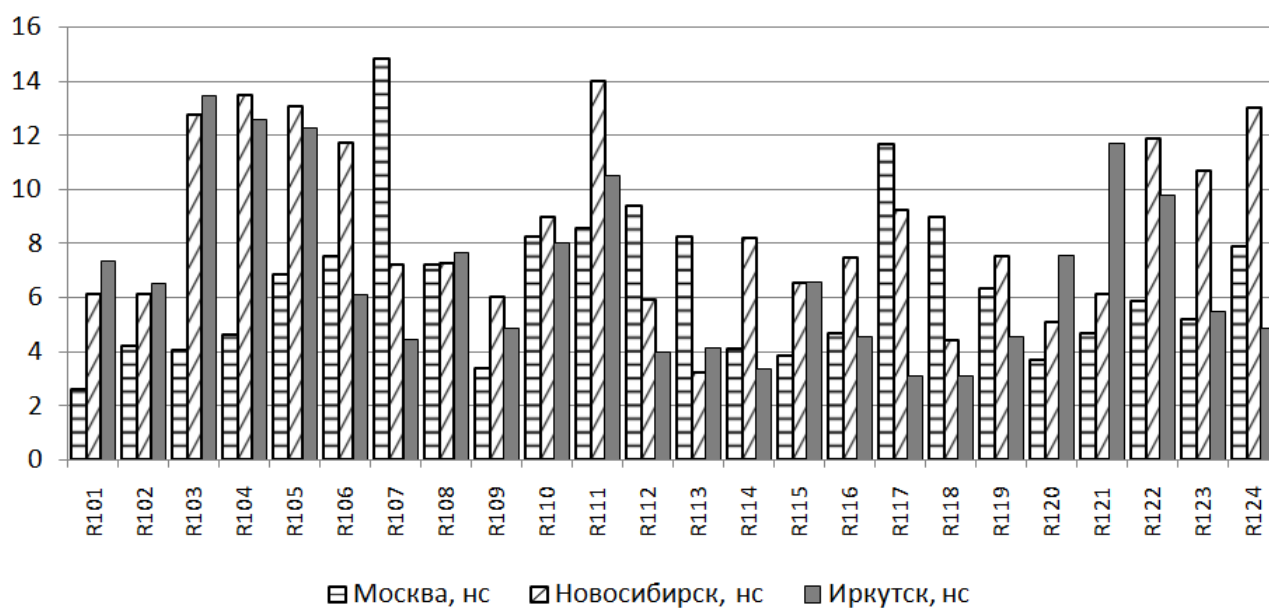


Рисунок 2.5 – СКО погрешностей частотно-временных поправок

2.5 Основные результаты и выводы

2.5.1 Проведенные исследования характеристик нестабильностей часов показали, что задача идентификации параметров нестабильности сводится к выбору адекватных математических моделей этих нестабильностей и выбору мер,

описывающих физические процессы уходов часов. Эти математические модели и характеристики нестабильностей необходимы для:

- построения алгоритмов оценивания текущих значений уходов часов по результатам тех или иных измерений и оптимального выбора параметров указанных алгоритмов,

- расчета прогнозов для уходов часов в виде частотно-временных поправок к показаниям часов,

- оценивания точности применения тех или иных ЧВП.

2.5.2 На основе анализа применяемых математических моделей уходов бортовых часов предложена уточненная модель, идентифицирующая параметры долговременной нестабильности и отклонения, вызванные гравитационными и релятивистскими эффектами.

2.5.3 Решена задача по обеспечению контроля качества частотно-временной информации (ЧВИ) и формирования оценок уходов бортовых часов по данным беззапросных траекторных измерений на базе пункта ГСВЧ ФГУП «СНИИМ». Результаты оценивания уходов бортовых шкал времени НС ГНСС показали, что разработанный автором алгоритм осуществляет решение поставленной задачи с высокой точностью и достоверностью результатов оценок.

2.5.4 Кроме того разработанный алгоритм оценивания уходов бортовых шкал времени бортовых часов НС ГНСС по данным беззапросных траекторных измерений позволяет рассчитать дополнительные частотно-временные поправки в режиме Ultra-rapid.

Глава 3. Разработка алгоритмов статистического оценивания параметров нестабильности бортовых часов по данным беззапросных траекторных измерений

3.1 Предварительная обработка данных траекторных измерений

3.1.1 Погрешности, порожденные внешними факторами

В ряде случаев, полученные результаты траекторных измерений нуждаются в предварительной обработке, с целью повышения ее информативности и надежности. Предварительная обработка измерительной информации заключается в выделении из совокупности полученных данных информативных компонент и в компенсации (подавлении) неинформативных составляющих.

Проведенный автором анализ траекторных ГНСС-измерений [53] и присутствующих погрешностей в результатах выявил наиболее существенные факторы, искажающие результаты траекторных измерений.

1. Выбросы в измерениях, образованные вследствие многолучевости распространения сигналов. Приводят к существенному искажению сигнала и к погрешностям слежения за параметрами этого сигнала (задержкой, частотой и фазой). Исследования влияния многолучевости на радиосигнал [54] показали большой разброс значений погрешности траекторных измерений составляет порядка 0,5-2 м в случае использования специальных антенн и до 100 м в городских условиях с высотными зданиями. Более подробно о природе эффекта многолучевости и способы борьбы с влиянием на результаты траекторных спутниковых измерений рассмотрены в п. 3.2.
2. Разрывы в результатах измерений. Потеря НС из зоны радиовидимости приемника влечет за собой пропуски в данных, которые необходимо восполнить. Это обстоятельство актуально как для кодовых, так и для фазовых измерений.
3. Скачки фазы и потери фазовых циклов. В момент потери синхронизации и возобновления последующих измерений возникает скачок фазы с

неизвестной амплитудой. Чтобы сохранить возможность использования фазовых измерений необходимо этот скачек идентифицировать (определить момент возникновения скачка и его амплитуду) и ввести соответствующую компенсирующую поправку в фазовые измерения.

3.1.2 Методы предварительной обработки траекторных измерений

Несмотря на большое количество алгоритмов предварительной обработки траекторных измерений, существующих в настоящее время [55], остается необходимость синтеза алгоритма, который на этапе первичной обработки результатов траекторных измерений, решал бы проблемы, связанные с выбросами и разрывами в данных, а также со скачками фазы. Наиболее приемлемыми подходами к обнаружению выбросов выделяют:

1. подход, основанный на линейной теории оценивания с использованием рекуррентной процедуры калмановской фильтрации;
2. использование робастных процедур и медианной фильтрации [44], [55].

Формализация автором метода калмановской фильтрации со свойствами робастной системы приведена в работе [53]. Ниже описана идейная сторона метода предварительной обработки траекторных измерений.

В работе предварительная обработка проводилась с помощью робастных алгоритмов фильтрации, которые нечувствительны к выбросам в данных, обеспечивают гладкое восполнение пропущенных данных и позволяют идентифицировать скачки фазовой неоднозначности в фазовых измерениях.

Метод оценивания состояния динамических систем с использованием фильтра Калмана (ФК) получил широкое распространение в практике статистической обработки траекторных измерений. Это объясняется тем, что алгоритм калмановской фильтрации имеет удобную для реализации рекуррентную форму и обеспечивает определение оценок с минимальными дисперсиями в классе линейных оценок.

При использовании ФК вычисление оценки выполняется с опорой на предыдущее значение. В случае появления в выборке аномального значения, соответствующая ему оценка несет за собой ошибку и в следующие вычисления, существенно снижая эффективность фильтрации. Именно поэтому использова-

ние алгоритма калмановской фильтрации в чистом виде не приносит ожидаемых результатов. Для исключения подобного эффекта необходимо предварительно исключить из выборки аномальные значения, и только после этого использовать вышеизложенную процедуру.

Для устранения данной проблемы вводится доверительный интервал. Все значения, не входящие в этот интервал исключаются, и в качестве оценки использовать сам прогноз. В случае прихода пачки выбросов ошибка фильтрации накапливается, с каждым новым выбросом уводя оценку все дальше и дальше за доверительный интервал. Таким образом, перед использованием адаптивной процедуры калмановской фильтрации, необходимо произвести исключение пачек выбросов. Наиболее подходящим в условиях действия выбросов является способ робастного оценивания параметров траекторных измерений [56]. К семейству робастных оценок относится медиана. Метод фильтрации, основанный на использовании этой статистики, называется медианной [55].

Медианная фильтрация осуществляется посредством движения некоторой скользящей полосы, содержащей в себе нечетное количество точек (апертуры) вдоль последовательности измерений и замены значения элемента выборки в центре апертуры медианой исходных значений отсчетов, принадлежащих рассматриваемому скользящему интервалу. После применения медианного фильтра, получается более гладкая (по сравнению с исходной) результирующая последовательность измерений. Основным преимуществом медианных фильтров над линейными фильтрами является эффективность при борьбе с импульсными шумами, к классу которых можно отнести и выбросы, но они хуже фильтруют шумы измерений.

Вследствие использования ФК в массиве оценок возникает динамическая погрешность, наличие которой объясняет фазовый сдвиг. Для исключения этой погрешности, а также получения более гладкой результирующей последовательности измерений применим метод получения оценки путем взятия среднего, между оценками полученными в результате фильтрации измерений в прямом и обратном направлениях.

Для анализа качества оценивания выборки измерений в условиях действия выбросов используем СКО, характеризующая степень наличия шумов в данных. Величины СКО при использовании различных процедур оценивания представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 — Сравнение процедур оценивания выбросов траекторных измерений

| Процедура оценки | СКО, м |
|------------------------------------|--------|
| Без использования фильтрации | 20 |
| Адаптивный фильтр Калмана | 4,2 |
| Медианный фильтр | 11,7 |
| Среднее между прямым и обратным ФК | 2,3 |

Из таблицы 3.1 видно, что помехи лучше обрабатывает адаптивный фильтр Калмана. Но использование его в чистом виде неоправданно из-за возможности появления в измерениях пачки выбросов, тогда как фильтры, использующие свойство робастности медианы хорошо справляются с этой проблемой.

Уменьшение шумов и исключение аномальных значений, а также использование компенсирующих поправок для фазовых измерений позволяет осуществлять корректировку частотно-временных параметров часов в целях улучшения качества координатно-временных определений ГЛОНАСС [57], [58], [59].

3.2 Анализ влияния многолучевости на качество траекторных измерений

Из числа влияющих факторов выделяют фактор, связанный со средой распространения сигнала и порождающий аномальные значения в виде единичных или пакетов выбросов. Источником этих выбросов является отражение сигнала на пути распространения от размещенной на навигационном спутнике (НС) антенне до антенны приёмной аппаратуры. Это явление называют многолучевостью (также многопутностью в области наук о Земле) [60].

Многолучевость возникает при приёме на антенну одновременно отражённого навигационного радиосигнала и прямого сигнала, т.к. сигналы навигационных спутников распространяются по множеству путей. Отражение радиосигнала возникает вследствие расположения вблизи приёмной антенны различных пред-

метов и объектов (зданий, деревьев, металлических конструкций и т.д.). В результате антенна принимает помимо прямых сигналов ещё и отраженные, прошедшие большой путь. Это приводит к дополнительной задержке суммарного сигнала [37].

Из-за разностей в длинах пути прохождения прямых и отражённых радиосигналов, отраженные имеют смещения кода и фазы несущей. Влияние многолучевости проявляется как в фазовых измерениях, полученных путём отсчёта фазовых циклов сигнала, так и в кодовых измерениях, основанных на применении моделирующих сигналов. При этом величина погрешности по кодовым сигналам может достигать 50 м; по фазе несущей не превышает $1/4$ длины волны, т.е. 5-6 см [60].

Влияние многолучевости сигнала на результаты траекторных измерений зависит от ряда факторов:

1. мощности и величины задержки отраженного радиосигнала;
2. взаимного расположения НС и приёмника;
3. характеристики затухания в антенне;
4. обработки сигнала в приёмнике.

Многолучевость является причиной существенного ослабления навигационного сигнала, а в отдельных случаях приводит к нарушению работы приёмной аппаратуры. Поэтому возникает необходимость в устранении влияния многолучевости. В настоящее время не существует универсального метода борьбы с многопутностью и общей математической модели для определения и предсказания её влияния.

Трудности исследования многолучевости, сложность оценивания погрешности, вносимой в результаты траекторных измерений, требуют привлечения специальных методик вычленения влияния указанного фактора. В работе [54] проводились экспериментальные сравнительные исследования и составляют основной предмет составной части ОКР «НКУ оценка СНИИМ». Экспериментальные характеристики аппаратуры БИС 14Ц161 сравнивались на площадке ГОУ ВПО «СГГА» с образцовой аппаратурой Trimble NetR5 и на площадке ФГУП «СНИИМ» с аппаратурой JAVAD Legacy и JAVAD Triumph. По результатам этого сравнительного анализа было оценено влияние многолучевости радиосигнала на точность беззапросных траекторных измерений, а также исследованы возможности компенсации этого влияния (п. 4.2).

Для уменьшения влияния многолучевости существует несколько возможностей [61].

Пространственная обработка навигационного радиосигнала.

1) Использование антенны с отсекающими ground plane или заглушающими кольцами choke-ring и антенные решётки, уменьшающие отражающие сигналы [62]. Является наиболее простым способом уменьшения влияния многолучевости путём использования металлического диска в горизонтальной плоскости, призванного экранировать антенну от отражённых сигналов от земной поверхности. На диске располагают концентрические окружности, действующие как передающие линии и уменьшающие влияние паразитных лучей при прохождении спутников на малых углах места. Однако подобная антенна не может устранять отраженные сигналы от объектов, расположенных над ней [61].

2) Многоантенная пространственная обработка. Используется составная антенна и сигнал принимается в нескольких точках пространства, затем путём их совместной обработки алгоритмически добиваются уменьшения влияния многолучевости [60], [61].

Методы подавления многолучевости в приёмной аппаратуре. Данные методы основаны на корреляционной обработке сигналов. Устанавливается синхронизация опорного дальномерного кода приёмника и дальномерного кода в сигнале и выражается через корреляционную функцию.

- фиксация взаимной корреляционной функции в корреляторах по переднему фронту;

- «узкий коррелятор», в котором обеспечивается сужение пика взаимной корреляционной функции;

- технология MET (Multipath Elimination Technology), в соответствии с которой стандартный коррелятор дополняется дополнительными каналами, образующими два ранних и два поздних коррелятора (MET подавляет от 25 % до 50 % остаточной многолучевости);

- технология MEDLL (Multipath Estimating Delay Lock Loop), более строгая, чем MET, расширен при помощи добавочных корреляторов. С помощью этого метода корреляционная функция разделяется на прямую и многолучевую компоненты, оцениваются из амплитуды, фазы и задержки.

- стробовые корреляторы – накопители произведения входной суммы сигналов и помех на опорный сигнал, представляющий собой последовательность стробов citeGenike2004, [61], [63].

В целях исследования влияния многолучевости на результаты траекторных измерений был проведён эксперимент по определению точностных характеристик приёмной аппаратуры МРК 33, составляющих сеть БИС 14Ц160. Основные результаты исследований влияния многолучевости на результаты траекторных измерений приведены в п. 4.2.

Методика RinexAnalyze основана на выделении из результатов дальномерных измерений составляющих, связанных с многолучевостью распространения навигационного сигнала. Влияние многолучевости на наблюдение расстояния оценивалось по комбинации кодовых и фазовых измерений на частотах $L1$ и $L2$. Исходными данными для анализа были взяты результаты дальномерных измерений в формате RINEX [64]. Также дополнительно требуется информации о координатах антенных модулей измерителей и об высокоточных эфемеридах спутников, навигационные сигналы которых используются для обработки. Методика RinexAnalyze допускает шесть режимов обработки данных дальномерных измерений к которым используются разные комбинации кодовых и фазовых измерений.

Согласно методике RinexAnalyze для выделения эффектов от многолучевости формируются разности кодовых и фазовых измерений в диапазонах частот $L1$ и $L2$

$$Z(CT) = \left[D_{L1}^C - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \cdot (D_{L2}^C - D_{L1}^C) \right] - \left[\varphi_{L1} - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \cdot (\varphi_{L2} - \varphi_{L1}) \right], \quad (3.1)$$

$$Z(BT) = \left[D_{L1}^P - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \cdot (D_{L2}^P - D_{L1}^P) \right] - \left[\varphi_{L1} - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \cdot (\varphi_{L2} - \varphi_{L1}) \right], \quad (3.2)$$

$$Y(CT) = D_{L1}^C - \varphi_{L1} - 2 \cdot \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \cdot [\varphi_{L1} - \varphi_{L2}], \quad (3.3)$$

$$Y(BT) = D_{L1}^P - \varphi_{L1} - 2 \cdot \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \cdot [\varphi_{L1} - \varphi_{L2}]. \quad (3.4)$$

где $Z(CT)$, $Z(BT)$, $Y(CT)$, $Y(BT)$ - критерии оценки доли эффектов от многолучевости в результатах дальномерных измерений;

D_{L1} , D_{L2} , D_{L1}^P , D_{L2}^P - результаты измерений псевдодальностей по кодам стандартной точности (С-код) и кодам высокой точности (Р-код) в диапазонах частот $L1$ и $L2$;

φ_{L1} , φ_{L2} - результаты измерений дальностей по фазам несущей в диапазонах частот $L1$ и $L2$;

f_{L1}, f_{L2} - несущие литерные частоты в диапазонах частот $L1$ и $L2$.
 $\frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \cdot (D_{L2} - D_{L1}), \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \cdot (\varphi_{L2} - \varphi_{L1})$ – ионосферная групповая задержка на частоте $L1$ [60], [37].

Подобный подход вызван предположением о том, что результаты кодовых измерений в большей степени подвержены влиянию многопутности на навигационный сигнал. В фазовых измерениях по причине инерционности контура фазовой автоподстройки частоты эффект многопутности проявляется в меньшей степени [55]. Однако результаты оценивания имеют большую шумовую дорожку. Это обстоятельство вызвано исключением ионосферного влияния путём оценивания на основе комбинаций двухчастотных измерений.

3.3 Построение адекватной математической модели нестабильности частоты

Исследования нестабильностей часов сводятся к выбору приемлемых математических моделей для этих нестабильностей и выбору мер и характеристик нестабильностей, адекватных физическим процессам порождающим уходы часов. Эти математические модели и характеристики нестабильностей необходимы для:

- построения алгоритмов оценивания текущих значений уходов часов по результатам тех или иных измерений и оптимального выбора параметров указанных алгоритмов,
- расчета прогнозов для уходов часов в виде частотно-временных поправок к показаниям часов,
- оценивания точности применения тех или иных ЧВП.

Справиться с проблемой оценки нестабильности часов позволяют структурные функции [10], частным случаем которых является дисперсия Аллана [Приложение А].

Применяемая математическая модель нестабильности частоты для бортовых стандартов имеет полиномиальный вид и характеризуется параметрами $\Delta T(t_k), s(t_k)$ - положение шкалы времени и смещение частоты часов.

В той или иной степени метрологические характеристики бортовых часов оказываются зависимыми от эффектов гравитационной и релятивистской при-

роды [65]. Это обстоятельство заставляет учитывать такие зависимости путем введения дополнительных составляющих в математические модели нестабильности применяемых часов.

Параметры такой модели (1.6) оцениваются из траекторных измерений, проводимых ресивером, согласно п. 1.4.2.

Использование таких моделей особенно актуально при формировании эфемеридно-временной информации в режиме Ultra-rapid [52], где требуется высокоточное прогнозирование положений шкал времени применяемых часов.

3.4 Разработка алгоритма прогнозирования уходов бортовых часов на основе полученной математической модели на определённом интервале времени

Алгоритм прогнозирования уходов бортовых часов строится на основе полной математической модели нестабильности на определенном интервале времени.

Процедура прогнозирования уходов бортовых часов заключается в экстраполяции оцененных параметров нестабильности часов из модели (1.6), полученных на основе траекторных измерений за предшествующий периоду прогнозирования. Период наблюдений составляет двое суток. В качестве опорных часов выступает вторичный эталон времени, частот ВЭТ 1-19, синхронизированных с первичным государственным эталоном РФ.

Из оцененных текущих уходов часов НС исключается составляющая $F_{rel}(t)$, обусловленная влиянием релятивистских эффектов. Т.о. полученные значения отражают только собственную нестабильность частоты бортовых стандартов, что позволяет оценить параметры $\Delta T(t_k)$, $s(t_k)$ на определенном интервале времени наблюдений $[t_k, t_{k+1}]$.

Затем оценки $\Delta T(t_k)$ и $s(t_k)$ выступают в роли параметров модели для прогнозирования на интервале $[t_{k+1}, t_{k+2}]$

$$\Delta \vec{T}(t_{k+2}) = \Delta T(t_{k+1}) + s(t_{k+1}) \cdot (t_{k+2} - t_{k+1}) + \int_{t_{k+1}}^{t_{k+2}} w(\tau) d\tau + \int_{t_{k+1}}^{t_{k+2}} \vec{F}_{rel}(\tau) d\tau. \quad (3.5)$$

Тогда, учитывая (3.5), находим что ошибка прогноза равна

$$e(t_{k+2}) = \Delta \vec{T}(t_{k+2}) - \Delta T(t_{k+1})$$

3.5 Алгоритм построения групповой шкалы времени часов

Объединение часов в группы позволяет повысить стабильность частоты. Такой подход построения шкалы времени используется в следующих системах:

- эталонные комплексы хранения и воспроизведения единиц времени, частоты и шкалы времени Государственной службы времени и частоты (ГСВЧ) и системы единого времени [39];

- сети беззапросных измерительных систем (БИС) космического комплекса ГЛОНАСС [12];

- орбитальные группировки навигационных спутников ГЛОНАСС, оснащённых бортовыми часами и бортовой аппаратурой межспутниковых измерений (БАМИ) [40];

- большой ряд радионавигационных систем наземного базирования;

- комплексы геофизической аппаратуры.

Перечисленные информационно-измерительные системы, локальные и пространственно распределённые, отличаются типами применяемых в их составе часов, способами синхронизации этих часов внутри группы и способом передачи для этих систем размеров эталонных единиц времени и частоты.

Высокие требования к точности и надёжности согласования шкал времени заставляют объединять часы указанных систем в группы. При этом, опираясь на результаты сличений часов внутри группы, требуется совместно оценивать параметры нестабильности часов и рассчитывать с помощью идентифицированных математических моделей нестабильностей компенсирующие поправки к уходам часов группы относительно эталонных шкал.

Применение этих поправок обеспечивает согласованность шкал времени часов внутри группы, а последовательность перечисленных операций составляет алгоритм формирования шкалы группового хранителя времени.

Существует ряд подходов к объединению хранителей времени в группы и формированию групповых шкал [66], [67], [68]. Наиболее общий подход предполагает описание ансамбля из n хранителей времени дискретным уравнением

[66], [69] на момент времени $T(t_k) = k, T(t_{k+1}) = k + 1$

$$\mathbf{x}(k + 1) = A \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{u}(k), \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (3.6)$$

с расширенным вектором состояния $\mathbf{x}(k)$, включающим векторы параметров нестабильности часов, и применение рекуррентной процедуры калмановского типа для оценивания этого расширенного вектора состояния, а $\mathbf{u}(k)$ — погрешность измерений.

Важным этапом в формировании шкал группового хранителя, предшествующим процедуре текущего оценивания вектора $\mathbf{x}(k)$, является расчет начальных условий $\mathbf{x}(0)$. Для этого в группе выделяется опорный хранитель - часы с наилучшими в группе метрологическими характеристиками, и для этого опорного хранителя выполняется процедура передачи размеров единиц времени, частоты и момента шкалы времени от эталонного хранителя времени. С этой целью проводятся сеансы синхронизации опорного хранителя времени и эталонных часов [70]. Передача размеров единиц от одного опорного хранителя внутри группы реперным хранителям времени производится на основе данных внутренних сличений часов $y(k)$, полученных в соответствии с уравнением измерений

$$\mathbf{y}(k) = C \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k). \quad (3.7)$$

В уравнениях A и C матрицы известной структуры, $\mathbf{u}(k)$ и $\mathbf{v}(k)$ - векторные случайные последовательности с известными в ряде случаев статистическими характеристиками. Вид уравнения измерений 3.7, структура матрицы C и характер погрешности $\mathbf{v}(k)$ зависят от типа информационно-измерительной системы, имеющая в своем составе квантовые стандарты частоты, и от применяемого метода сличения этих стандартов.

Описание ансамбля хранителей времени строится на основе математической модели нестабильности единичных часов (1.6, п. 1.2).

При использовании уравнений (1.6), для описания нестабильности ансамбля из n часов в виде уравнения (3.6), элементы этого уравнения определяются следующим образом. Расширенный вектор состояния ансамбля часов имеет вид $\mathbf{x}^T(k) = (\mathbf{a}^T(k), \Delta \mathbf{T}^T(k))$. С учетом того, что в группе выделен опорный хранитель имеющий индекс $i = 1$ и группа хранителей-реперов, вектор долговременной составляющей нестабильности частоты генератора из уравнения 2.1 часов $\mathbf{a}^T(k) = (a_1(k), \mathbf{a}_P^T(k))$ представляется в виде комбинации частоты опорного хранителя $a_1(k)$ и вектора частот реперов $\mathbf{a}_P^T(k) =$

$(a_{P_i}(k), i = 2, \dots, n)$. Аналогичным образом представляются: вектор ухода часов $\Delta \mathbf{T}^T(k) = (\Delta T_{n+1}(k), \Delta \mathbf{T}_P^T(k))$, $\Delta \mathbf{T}_P^T(k) = (\Delta T_{P_i}(k), i = n+2, \dots, 2n)$. Вектор кратковременных нестабильностей часов $\mathbf{u}^T(k) = (\mathbf{u}_0^T(k), \mathbf{u}_T^T(k))$ также включает нестабильности частот $\mathbf{u}_0^T(k) = (u_{0_i}(k), i = 1, \dots, n)$ и нестабильность шкал времени $\mathbf{u}_T^T(k) = (u_{T_i}(k), i = n+1, \dots, 2n)$.

В выражениях (3.6) и (3.7) $A = \begin{pmatrix} E & O \\ H & E \end{pmatrix}$, $C = \begin{pmatrix} I & -E \\ I & -E \end{pmatrix}$ -блочные матрицы, E - единичная матрица, I -единичный вектор-столбец, O - матрица с элементами 0, H - диагональная матрица с элементами h .

В уравнении (3.7) вектор измерений $\mathbf{y}^T(k) = (\mathbf{y}_0^T(k), \mathbf{y}_T^T(k))$ образован вектором измерений разности частот

$$\mathbf{y}_0(k) = I \cdot a_1(k) - \mathbf{a}(k)$$

опорного хранителя $a_1(k)$ и частот хранителей-реперов $\mathbf{a}(k)$ и вектором измерений разностей моментов шкал

$$\mathbf{y}_T^T(k) = I \cdot \Delta T_{n+1}(k) - \Delta \mathbf{T}_p(k)$$

между моментом шкалы опорного хранителя $\Delta T_{n+1}(k)$ и шкалами хранителей-реперов $\Delta \mathbf{T}_p(k)$. Аналогичным образом считаем, что вектор погрешностей измерений $\mathbf{v}^T(k) = (\mathbf{v}_0^T(k), \mathbf{v}_T^T(k))$ включает в себя вектор погрешностей измерений разностей частот $\mathbf{v}_0^T = (v_{0_i}(k), i = 2, \dots, n)$ и вектора погрешностей измерений разностей шкал времени $\mathbf{v}_T^T = (v_{T_i}(k), i = n+2, \dots, 2n)$. В измерениях индексация i соответствует составу расширенного вектора состояния $\mathbf{x}(k)$; $i = 1, \dots, n$ - для частотных измерений, $i = n+1, \dots, 2n$ для шкальных измерений.

Для оценивания вектора состояния ансамбля часов $\mathbf{x}(k)$ описывающегося уравнением (3.6) с использованием уравнения измерений (3.7) применяется стандартная рекуррентная процедура калмановского типа [71]. Полученные с помощью этой процедуры оценки $\hat{\mathbf{x}}(k)$ должны обеспечивать расчет компенсирующих поправок к моментам шкал хранителей, применение которых согласует шкалы времени этих хранителей с эталонной шкалой времени $T_3(k)$.

Для выполнения этих требований необходимо чтобы применяемый алгоритм оценивания был устойчивым. В этом случае свободная составляющая $\mathbf{e}_{св}(k)$ погрешности оценивания $\mathbf{e}(k) = \hat{\mathbf{x}}(k) - \mathbf{x}(k)$ с течением времени будет стремиться к нулю.

Точность оценивания характеризуется вынужденной составляющей погрешности оценивания $e_b(k)$, порожденной погрешностями измерений и кратковременными нестабильностями часов. Необходимо, чтобы эта составляющая оставалась в пределах заданной точности автономного хранения групповой шкалы времени.

Сравнительный анализ алгоритмов формирования шкал времени заключается в исследованиях возможностей обеспечения указанных требований.

Для локализованных хранителей времени, к которым можно отнести эталонные комплексы времени и частоты, имеется возможность организации взаимных сличений хранителей по частоте и по времени. Групповая шкала строится на основе измерений разностей частот

$$y_a(k) = I \cdot a_1(k) - \mathbf{a}_p(k). \quad (3.8)$$

Задача сводится к оценке усредненной по ансамблю часов частоты опорного хранителя $a_1(k)$ и расчету, с использованием математической модели нестабильности (1.6), момента шкалы времени $\Delta \hat{T}_1(k)$. Для выполнения оценивания, основываясь на гипотезе квазистационарности частоты реперов на интервале времени $[t_k, t_{k+1}]$, применяются прогнозы частот реперов $\vec{\hat{\mathbf{a}}}_p(k) = \hat{\mathbf{a}}_p(k-1)$, полученных на основе оценок частот реперов $\hat{\mathbf{a}}_p(k-1)$ для момента времени t_{k-1} .

Добавляя в левую и правую части уравнения (3.8) вектор прогнозов $\vec{\hat{\mathbf{a}}}_p(k)$, получается $n-1$ уравнение для оценок частоты опорного хранителя, вычисленных по каждому из реперов. Усредненная по ансамблю хранителей оценка частоты опорного хранителя вычисляется на основе равенства

$$\hat{\mathbf{a}}_1(k) = \frac{1}{n-1} [I^T \cdot (y_a(k) + \mathbf{a}_p(k))]. \quad (3.9)$$

В работе [72] показано, что алгоритм (3.9) не обладает устойчивостью в определенном выше понимании.

Важным требованием, определяющим работоспособность алгоритма (3.9) в режиме автономного формирования шкалы времени, является требование несмещенности оценки $\hat{\mathbf{a}}_1(k)$. Для обеспечения этой несмещенности необходимо чтобы:

- начальные условия $\mathbf{x}(0)$ были несмещенными,
- при организации группы необходимо начальные значения частот реперов $\hat{\mathbf{a}}_p(0)$ выбрать из условия равенства нулю среднего арифметического этих частот $\sum_{i=1}^{n-1} \hat{\mathbf{a}}_{pi}(0) = 0$,

- необходимым условием является отсутствие постоянных дрейфов частот $d_{pi}(k)$,

- требуется обеспечить центрированность погрешностей измерения $M \{ \mathbf{v}(k) \} = 0$.

Если условия несмещенности оценки частоты опорного хранителя $\hat{a}_1(k)$ не выполняются, то, согласно [69], шкала времени группового хранителя $\Delta \hat{T}_1(k)$ будет с течением времени автономной работы алгоритма расходиться от шкалы эталона $T_3(k)$.

Для группы пространственно разнесённых часов, как правило, отсутствует возможность частотных измерений, но требуется одновременная согласованность с эталонной шкалой $T_3(k)$ всех шкал времени хранителей группы. После оценки начальных условий $\mathbf{x}(0)$ на этапе синхронизации опорного хранителя группы с эталоном времени, внутри группы выполняются измерения разностей моментов шкал всех хранителей со шкалой опорного хранителя в соответствии с уравнением измерений

$$\mathbf{y}_T(k) = I \cdot \Delta T_1(k) - \Delta \mathbf{T}_p(k). \quad (3.10)$$

При этом необходимые оценки разностей частот рассчитываются по результатам шкальных измерений в соотношении с равенством

$$I \cdot \hat{a}_1(k) - \hat{a}_p(k) = \frac{1}{n} [\mathbf{y}_T(k) - \mathbf{y}_T(k-1)]. \quad (3.11)$$

Погрешность такого оценивания в этом случае будет зависеть не только от погрешностей шкальных измерений $\mathbf{v}_T(k)$, $\mathbf{v}_T(k-1)$, но и от характеристик нестабильности частот $\mathbf{u}_a(k)$, $\mathbf{u}_a(k-1)$ хранителей образующих группу.

Погрешности оценивания $\mathbf{e}(k) = \hat{\mathbf{x}}(k) - \mathbf{x}(k)$ вектора состояния $\mathbf{x}(k)$ в установившемся режиме анализируются на основе уравнения динамики алгоритма, полученного непосредственно из (3.6), (3.7) и уравнений, описывающих сам алгоритм фильтрации [71]. При определённых условиях, выполняемых в практических случаях, уравнения динамики можно считать линейным, что позволяет выделить свободную составляющую погрешности оценивания $\mathbf{e}_{CB}(k)$, характеризующую устойчивость алгоритма, и вынужденную составляющую $\mathbf{e}_B(k)$, порожденную погрешностями измерений $\mathbf{v}(k)$ и кратковременными нестабильностями часов $\mathbf{u}(k)$.

Устойчивость алгоритма [71] определяется свойствами квадратичной формы

$$J(k) = \mathbf{e}_{CB}^T(k) \cdot C^2 \cdot C \cdot \mathbf{e}_{CB}(k), \quad (3.12)$$

минимум который соответствует минимуму квадрата модуля вектора невязок $\mathbf{q}(k) = \mathbf{y}(k) - C \cdot A \cdot \hat{\mathbf{x}}(k)$. В общем случае для группы часов, описываемых уравнениями (3.6) и (3.7) матрица $C^T \cdot C$ является вырожденной, поскольку число уравнений измерений (3.7) меньше числа оцениваемых параметров n .

Критерий (3.12) для алгоритма оценивания в пространстве $\hat{\mathbf{x}}(k)$ представляет собой поверхность типа "параболический цилиндр" не имеющую единственного экстремума, что делает процесс сходимости оценок $\hat{\mathbf{x}}(k)$ к действительным значениям параметров $\mathbf{x}(k)$ неустойчивым.

Желательная ситуация попадания оценок $\hat{\mathbf{x}}(k)$ в точку близкую к $\mathbf{x}(k)$ возможна при отсутствии смещенности в оценках вектора начальных условий $\hat{\mathbf{x}}(0)$, при отсутствии постоянных дрейфов частот $\mathbf{d}(k)$ и при условии центрированности погрешностей шкальных измерений $\mathbf{v}_T(k)$.

Для группы пространственно разнесенных часов, при использовании для синхронизации опорного хранителя спутниковых навигационных сигналов, перечисленные условия выполнить достаточно сложно.

Один из возможных путей обеспечения устойчивости алгоритма оценивания [71] заключается в доопределении системы уравнений измерений уравнением прогнозирования частоты опорного хранителя вида (3.10) и уравнением прогнозирования моментов шкалы времени опорного хранителя.

Устойчивость алгоритма [71] также может быть обеспечена за счет доопределения системы уравнений измерений (3.7) дополнительными уравнениями измерений до системы линейно-независимых уравнений, где число уравнений не меньше числа оцениваемых параметров n . По-существу такое доопределение происходит во время сеансов синхронизации опорного хранителя группы с эталонными часами.

3.6 Исследование точности оценивания и выбор конструктивных параметров алгоритма из условия достижения минимальных погрешностей

Исследования погрешности представления уходов часов НС с помощью построенной математической модели проводились на базе метрологического пункта Государственной службы времени и частоты ФГУП «СНИИМ» (г. Но-

Новосибирск) [73]. Этот пункт позволил обеспечить условия для получения высокоточных результатов:

1. привязка шкалы времени наземного приемника к моменту шкалы государственного вторичного эталона времени и частоты ВЭТ 1-19, что позволяет исключать влияние на измерения составляющие $\Delta T_R(t)$;
2. имеются известные высокоточные координаты антенны приемника в системе координат ITRF;
3. измерения проводятся прецизионной аппаратурой приема навигационных сигналов Javad Sigma, Javad Legacy пункта ГСВЧ ФГУП «СНИИМ»;
4. имеется доступ к измерениям других метрологических пунктов, оснащенных эталонами времени и частоты (г. Москва, г. Иркутск).

Результаты оценивания погрешностей уходов действительных шкал времени по орбитальной группировке НС ГЛОНАСС приведены на рисунке 3.1). Обработка фазовых и кодовых траекторных измерений проводилась за 20.06.2016 г. на базе метрологического пункта Государственной службы времени и частоты в г. Новосибирск.

Аналитическая шкала времени представлена в виде кусочно-линейной функции, построенной на основе бортовых ЧВП, и сравнивается с полученными оценками уходов бортовых шкал времени НС № 730. На рисунке 3.1 видно, что в оценках уходов бортовых часов НС № 730 присутствует некоторая периодическая составляющая. Такое поведение бортовой шкалы времени связано с проявлением влияния второй зональной гармоникой J_2 .

Полученные оценки контроля частотно-временных параметров согласуются с данными, приведенными в бюллетенях Информационно-аналитического центра ГЛОНАСС [50]. На этом основании разработанный алгоритм может быть рекомендован в качестве инструмента оценивания уходов бортовых часов НС.

3.7 Планирование и организация измерительных экспериментов

Особое внимание при проведении сеансов навигационных измерений следует уделять вопросам планирования и организации эксперимента.

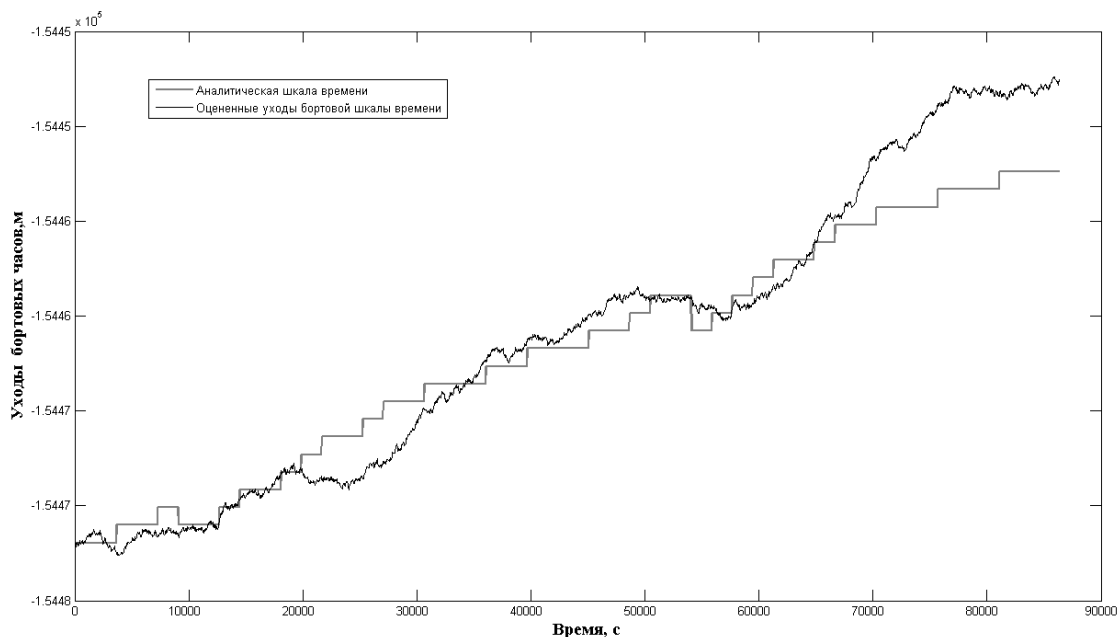


Рисунок 3.1 — Сравнение улода бортовой шкалы времени НС № 730 и соответствующей аналитической шкалы времени, построенной на основе ЧВП

Задача оптимального планирования навигационных измерений, которые необходимо реализовать для определения положения шкал времени НС, дает резерв обеспечения требуемой точности в тех ситуациях, когда другие возможности (повышение точности навигационных измерений, применение усовершенствованных математических моделей и алгоритмов обработки измерений) исчерпаны [[74].

Под задачей оптимального планирования подразумевается использование различных технических возможностей, например, выбор оптимального режима работы навигационных средств, управление процессом навигационных измерений.

Для планирования эксперимента все неконтролируемые факторы рассматриваются как стохастические, описываемые гауссовскими распределениями с известными характеристиками. Исходная задача интерпретируется как задача, возникающая при непрерывных измерениях, обрабатываемая по МНК [74].

При организации эксперимента следует учитывать следующие аспекты:

- выбор места расположения наземного опорного пункта, обеспечивающего благоприятные условия для наблюдения навигационных спутников;
- обеспечение одновременной работы всех приемников, участвующих в эксперименте;

- выбор сети ГНСС-приемников;
- выбор метода измерений (абсолютный, дифференциальный);
- выбор режима работы приемников.

Для обеспечения высокой точности на каждой станции должен быть предусмотрен достаточно продолжительный период радионаблюдений. Для повышения надежности каждый пункт должен определяться на основе двух полностью независимых измерений с использованием привязки к различным взаимосвязанным референтным пунктам. Необходимая информация для организации навигационных измерений:

- название пункта наблюдения и его условное обозначение;
- серийные номера основных компонентов (антенны, приемника и т.д.)
- координаты размещения антенны;
- время начала и завершения сеанса;
- номера спутников;
- координаты пункта наблюдения [60].

Материалы результатов исследований в части планирования и организации сеансов траекторных навигационных измерений внедрены в учебный процесс на основании рекомендации кафедры «Метрология и технология оптического производства» ФГБОУ ВО «СГУГиТ».

3.8 Основные выводы и заключение

3.8.1 Произведенный сравнительный анализ подходов и алгоритмов выявления и исключения выбросов (использование адаптивного линейного фильтра Калмана, медианного фильтра) показал целесообразность предварительной медианной фильтрации исходных данных перед применением линейного фильтра. Полученные на базе метрологического пункта ГСВЧ ФГУП «СНИИМ» результаты показали, что с применением разработанных авторами алгоритмов предварительной обработки траекторных измерений позволяет существенно повысить качество и надежность оценивания уходов бортовых шкал времени навигационных спутников ГЛОНАСС. Результаты обработки реальных сигналов хорошо согласуются с теоретическими положениями, положенными в основу синтеза робастных алгоритмов обработки измерительной информации.

3.8.2 Проведен анализ алгоритма оценивания уходов бортовых часов на основе полной математической модели нестабильности частоты. Результаты оценивания погрешности ЧВП для бортовых шкал времени орбитальной группировки ГЛОНАСС, полученные на базе метрологического пункта Государственной службы времени и частоты «СНИИМ», хорошо согласуются с аналогичными оценками таких погрешностей, приведенных в бюллетенях системы высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП).

3.8.3 Рассмотренные алгоритмы формирования шкал групповых хранителей времени на основе измеренной разностей шкал времени и разностей частот хранителей, образующих группу не являются устойчивыми, т.е. не гарантируют сходимости оценок к действительным значениям параметров нестабильности группы часов. Попадание оценок в малую окрестность для сравниваемых алгоритмов и удержание оценок в указанной окрестности возможно при выполнении специальных условий.

3.8.4 На основе проведенных исследований получены требования для планирования и организации проведения траекторных измерений с целью оценить уходы бортовых часов НС орбитальной группировки ГЛОНАСС.

Глава 4. Экспериментальные исследования алгоритмов оценивания параметров нестабильности часов по данным траекторных измерений

4.1 Анализ проявления многолучевости распространения радиосигналов (сравнение антенных модулей)

Для проведения исследований проявления многолучевости распространения навигационных радиосигналов использовались результаты измерений, выполняемые на двух площадках ФГБОУ ВПО «СГГА» и ФГУП «СНИИМ». Антенные поля ГОУ ВПО «СГГА» и ФГУП «СНИИМ» оборудованы реперными пунктами с известными координатами в системе ITRF 2000. Авторами сравнивались оценки метрологических характеристик комплектов приемной аппаратуры Trimble NetR5, JAVAD Legacy, JAVAD Sigma, БИС 14Ц161 (Таблица 4.1). Обработка измерений проводилась с помощью программного пакета RinexAnalyze.exe за период с 15 марта по 27 апреля 2011 г. В период проведения экспериментов на аппаратуру БИС 14Ц161 от пассивного водородного стандарта частоты VCH-1006 подавался опорный сигнал частотой 5 МГц и сигнал частотой 1 Гц, момент шкалы времени которых согласован с частотой и шкалой времени государственного вторичного эталона времени и частоты ВЭТ 1-19.

В таблице 4.2 знаком «+» отмечены доступные для обработки в протоколах RINEX виды дальномерных измерений по спутникам навигационной системы ГЛОНАСС.

Методика RinexAnalyze допускает шесть режимов обработки данных дальномерных измерений, в которых используются разные комбинации кодовых и фазовых измерений (уравнения (3.1)-(3.4)). Аппаратура БИС 14Ц161 не обеспечивает измерений по навигационным спутникам GPS в диапазоне D2, поэтому рассматриваются данные системы ГЛОНАСС. Это обстоятельство не позволяет использовать спутники GPS для сравнительного анализа аппаратуры БИС 14Ц161, поскольку ни один из возможных режимов RinexAnalyze для спутников GPS нереализуем. В уравнениях (3.1)-(3.4) отмечены режимы расчетов методики RinexAnalyze, которые использованы для сравнительного анализа аппаратуры.

Для определения точностных характеристик антенных модулей автором было проведено сравнение работы аппаратуры БИС 14Ц161, Trimble Net R5

в пункте ФГБОУ ВПО «СГГА». В качестве иллюстраций приведены графики $Y(BT)$ уравнения (3.1), по которым выполнялось сравнение (рисунки 4.1 – 4.3).

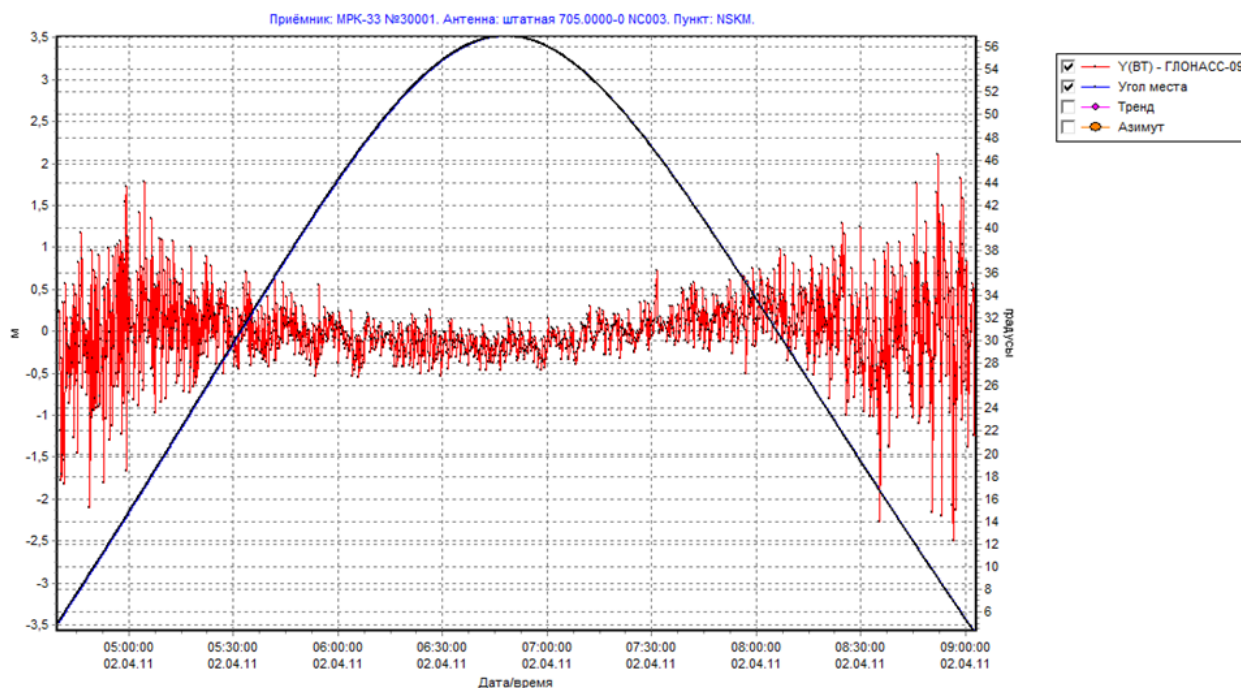


Рисунок 4.1 — $Y(BT)$ с приемника БИС 14Ц161, спутник ГЛОНАСС № 702

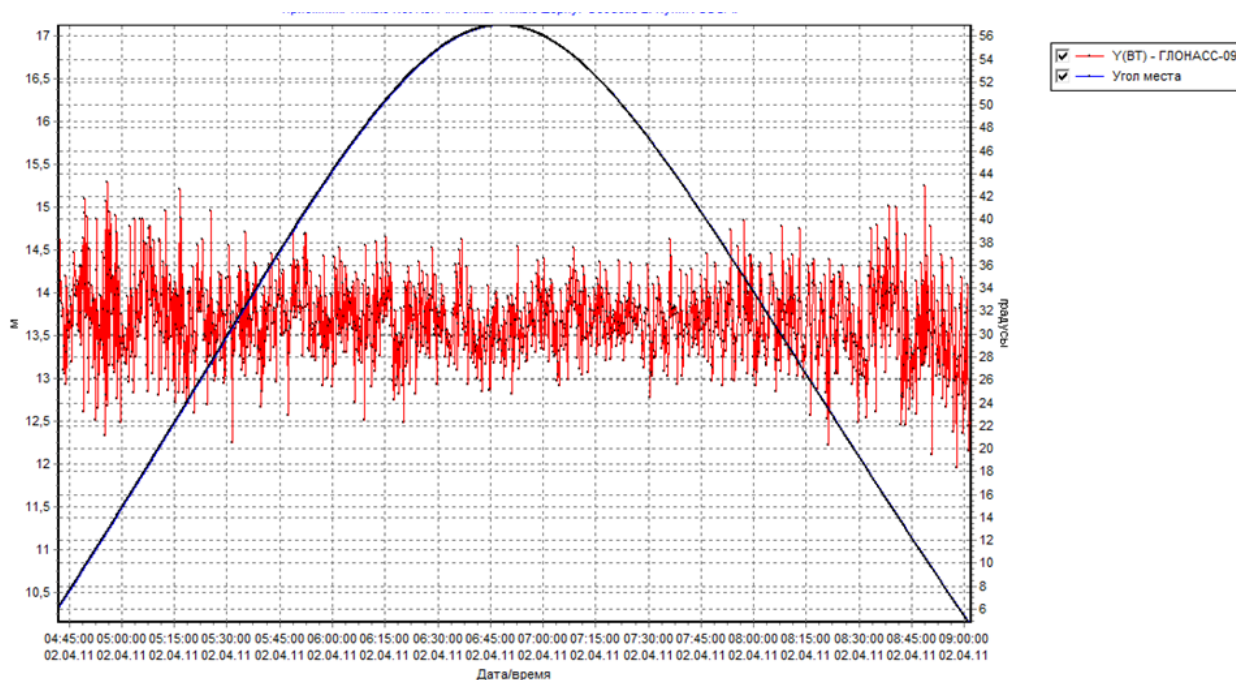


Рисунок 4.2 — $Y(BT)$ с приемника Trimble Net R5, спутник ГЛОНАСС № 702

Для пункта ФГУП «СНИИМ» результаты обработки измерений представлены на рисунках 4.4 и 4.5. В качестве критерия сравнения был выбран критерий $Z(BT)$ для НС ГЛОНАСС №734, как наименее помехоустойчивый. На примере проиллюстрированных данных спутника №734 за период 01.04.2011 – 02.04.2011

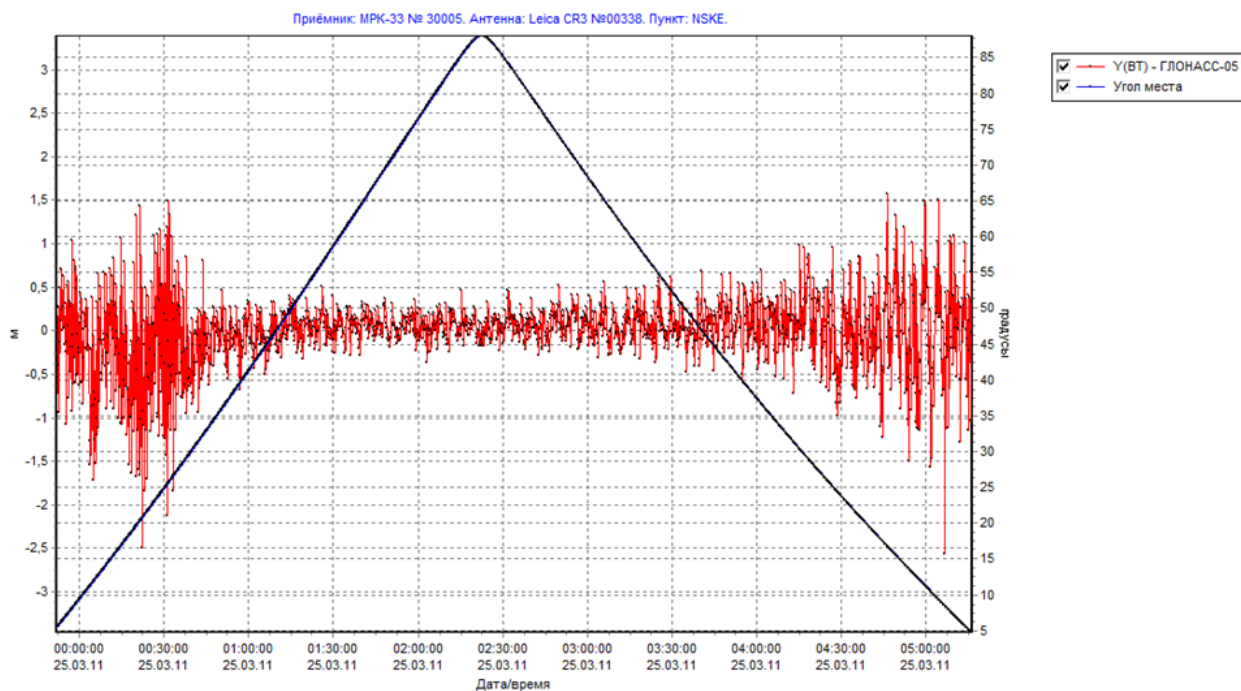


Рисунок 4.3 — Y(BT) с приемника БИС 14Ц161 с антенной Torson C R3, спутник ГЛОНАСС № 702

приведены следующие параметры: угол места, размах, тренд и время наблюдений.

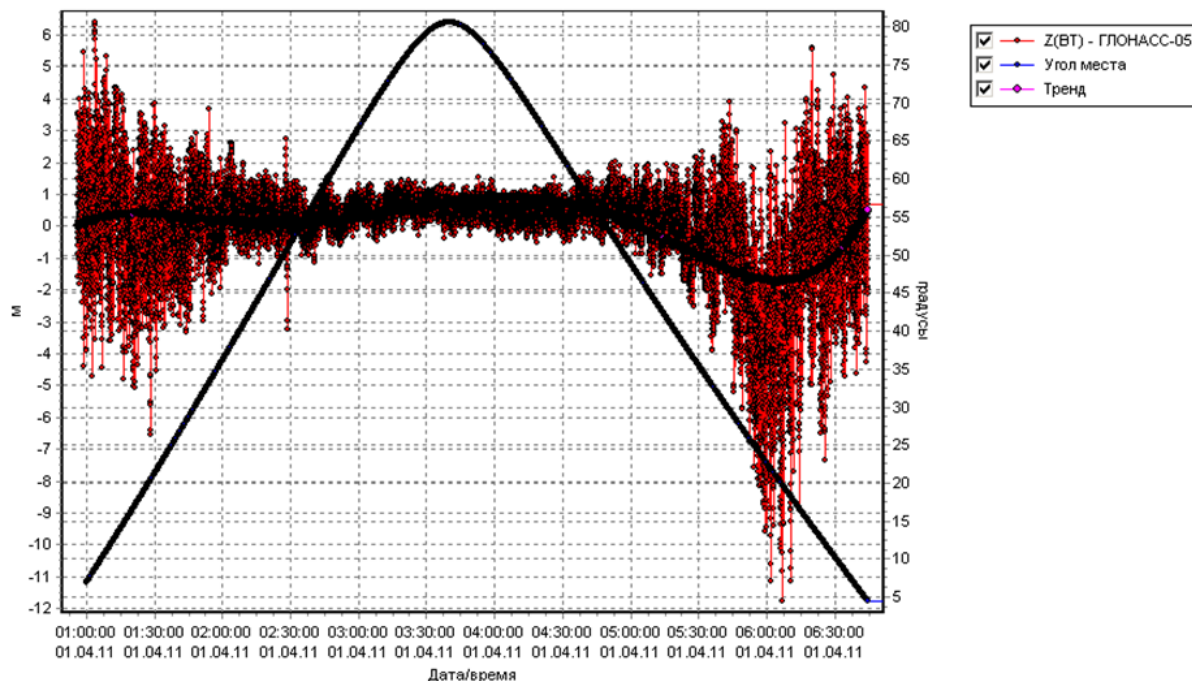


Рисунок 4.4 — Z(BT) с приемника БИС 14Ц161, спутник ГЛОНАСС № 734

В начале и в конце прохождения спутника (при малых углах места) явно видно проявление многолучевости, что наблюдается в отклонении тренда от

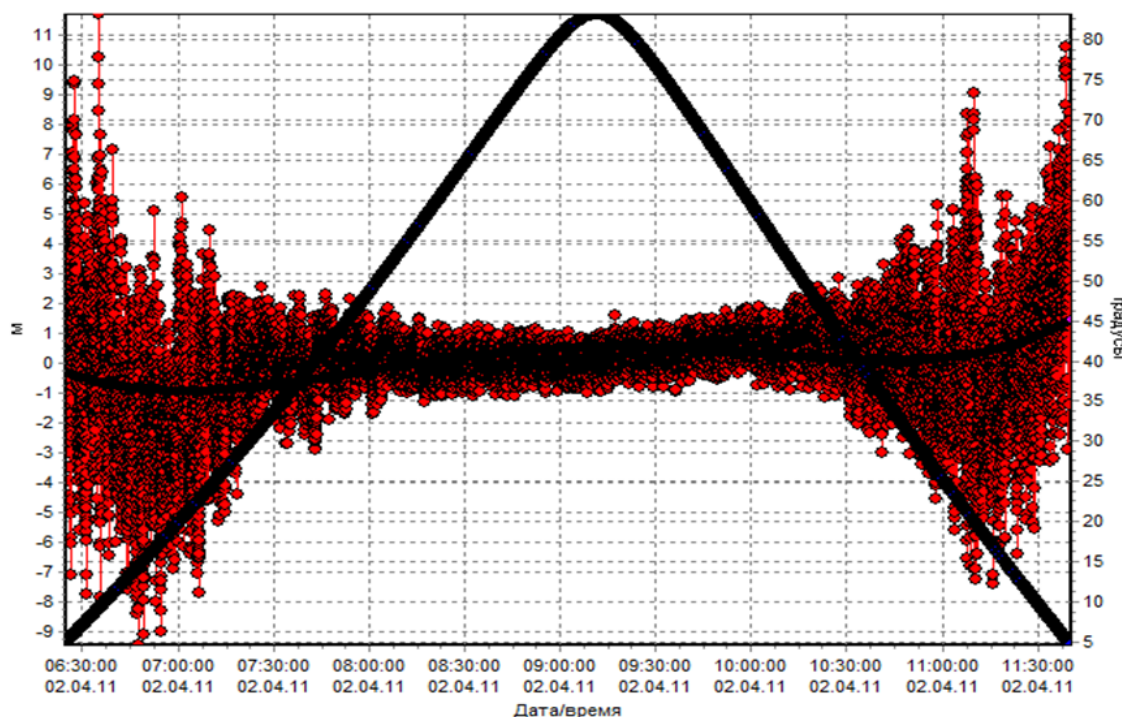


Рисунок 4.5 — Z(BT) с приемника JAVAD Sigma, спутник ГЛОНАСС № 734

нулевого уровня и обработанные данные показывают наибольший размах, и в большей степени содержит проявление многолучевости. Когда угол места достигает наибольшего значения, то многолучевость наименее влияет на принятие сигналов приемника и соответственно размах показывает наименьшее значение.

В результате проведенного анализа автором сделаны следующие выводы:

1) Сильная коррелированность разности кодовых и фазовых измерений в случаях, когда спутники повторяют траекторию движения, и слабую коррелированность – когда спутники движутся по разным траекториям. Подобное явление вызвано построением орбитальной группировки ГЛОНАСС (траектория движения спутника повторяется через 17 витков).

2) Зависимость влияния многолучевости на измерения от угла места. При наблюдении НС на углах возвышения меньше 35° наблюдается значительный размах (10 м) и отклонение тренда от среднего значения на конце витка.

3) Уровень шума кодовых измерений БИС 14Ц161 меньше при наблюдении НКА на больших углах возвышения ($> 35^\circ$). Наименьшее проявление эффекта многолучевости наблюдается в зените (90°).

4.2 Оценивание погрешностей представления бортовой шкалы времени с помощью ЧВП в условиях применения эталона времени и частоты ВЭТ 1-19

В целях получения оценок уходов бортовых часов навигационных спутников ГЛОНАСС в данной работе представлены результаты, обработанные в период с 14 августа по 28 сентября 2015 г. в метрологическом пункте контроля Государственной службы времени и частоты ФГУП «СНИИМ». Целью данной серии экспериментов было получение оценок уходов бортовых часов по данным фазовых и кодовых измерений, полученных с приемника Javad Legacy и Javad Sigma, а также определения качества прогнозных значений этих уходов. В качестве методологической основы для решения поставленной задачи автором применяется технология PPP [75].

В экспериментах использовались кодовые измерения P в диапазоне $L1$ и $L2$, а также фазовые измерения на несущих литерных частотах в диапазонах $L1$ и $L2$ по спутникам ГЛОНАСС. Выбор таких измерений обусловлен необходимостью получения высокоточных результатов. Для определения координат спутника использовались высокоточные эфемериды в формате $sp3$ -файла, предоставляемые информационно-аналитическим центром ГЛОНАСС [50].

Обработка траекторных измерений проводилась согласно разработанному алгоритму оценивания уходов бортовых часов спутников ГЛОНАСС (п. 1.4.2). Были выполнены следующие операции: — графическое представление оцененных уходов бортовых часов орбитальной группировки ГЛОНАСС; — рассчитаны погрешности представления бортовых шкал времени с помощью аналитических шкал; — рассчитаны статистические характеристики погрешностей представления бортовых шкал времени с помощью аналитических шкал.

Разработанный автором алгоритм для оценивания текущих уходов бортовых шкал времени спутников ГЛОНАСС и соответствующее программное обеспечение показали возможность осуществления контроля частотно-временной информации в опорном пункте ГСВЧ ФГУП «СНИИМ». Приведенные на рисунках 4.6 и 4.7 результаты оценивания уходов бортовых часов и оценивания погрешностей представления шкал времени этих часов в виде аналитической шкалы времени.

На основе полученных оценок погрешностей уходов бортовых часов орбитальной группировки ГЛОНАСС автором был сделан вывод о том, что не все

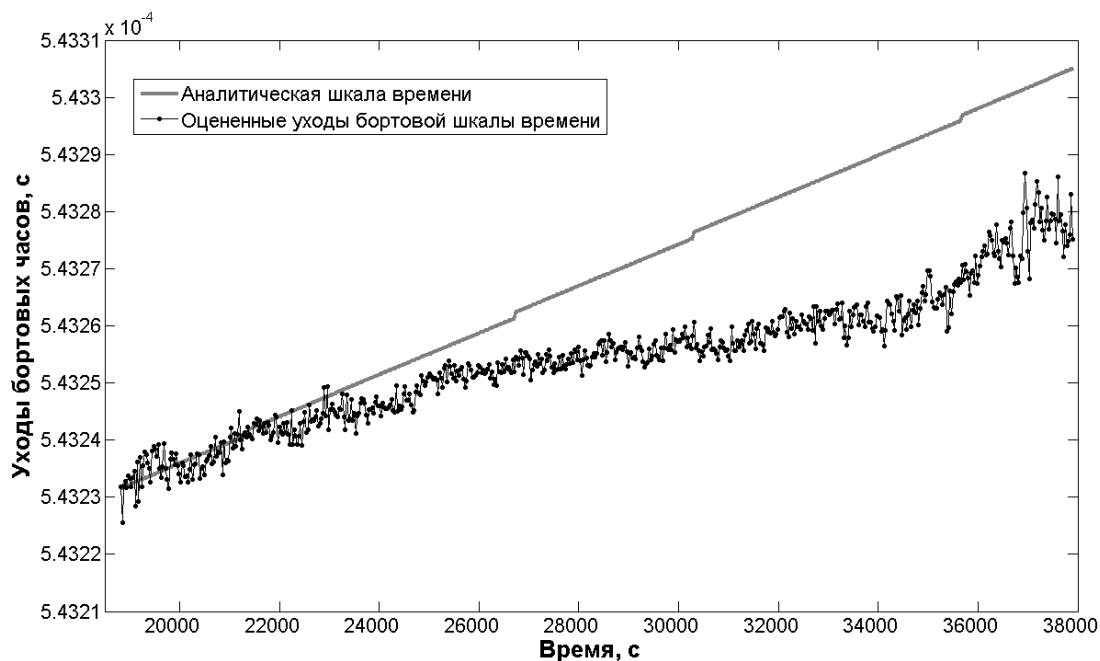


Рисунок 4.6 — Поведение действительной и аналитической шкалы времени навигационных спутников ГЛОНАСС №732.

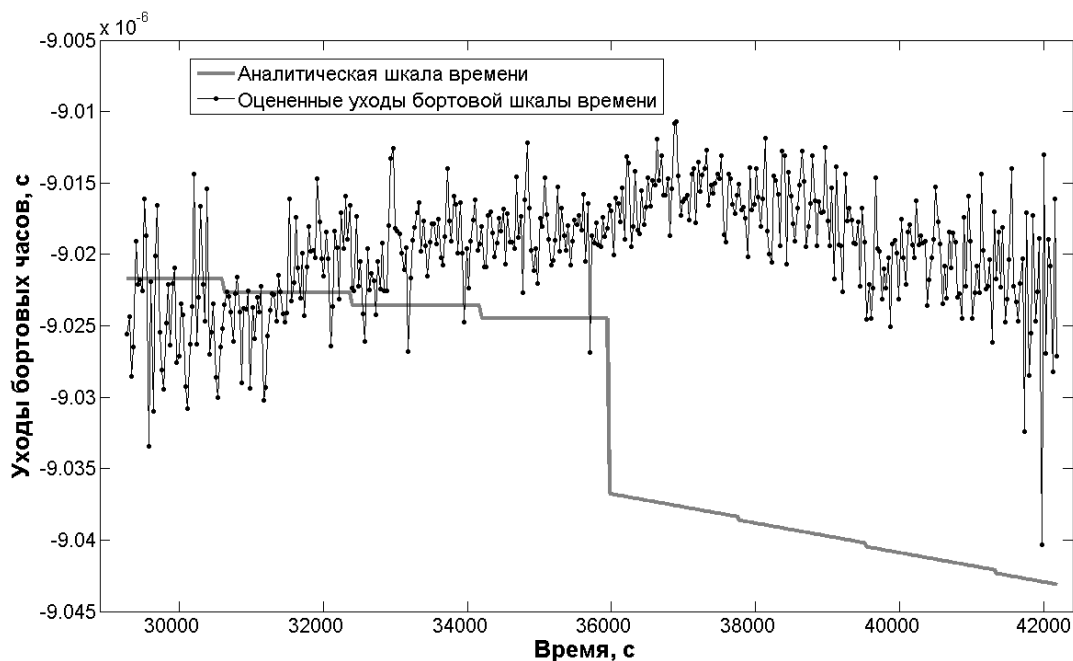


Рисунок 4.7 — Поведение действительной и аналитической шкалы времени навигационных спутников ГЛОНАСС №716.

аналитические шкалы позволяют удовлетворять требованиям, предъявляемым в высокоточным КВО специальными пользователями ГНСС-услуг (в таких сферах деятельности как геофизике, строительстве, геодезии, исследовании природных ресурсов, метрологическом обеспечении передачи единиц времени и частоты и

др.). Из 24 спутников системы ГЛОНАСС 70 % оцененных результатов показывают удовлетворительное качество прогнозирования уходов бортовых часов.

Рисунке 4.6 показывает случай, в котором прогнозируемые шкалы времени имеют значительные расхождения с действительным поведением часов. Бортовая шкала времени спутника № 732 говорит об ошибочном оценении изменения частоты. Причиной такого поведения может выступать проявление влияния эффектов гравитационной и релятивистской природы на функционирование стандарта частоты.

В случае спутника № 716 (рисунок 4.7) неверно введена коррекция момента шкалы времени. Исправить такое положение позволяет применение дополнительных частотно-временных поправок, рассчитанных в условиях применения аппаратуры эталона времени и частоты ВЭТ 1-19.

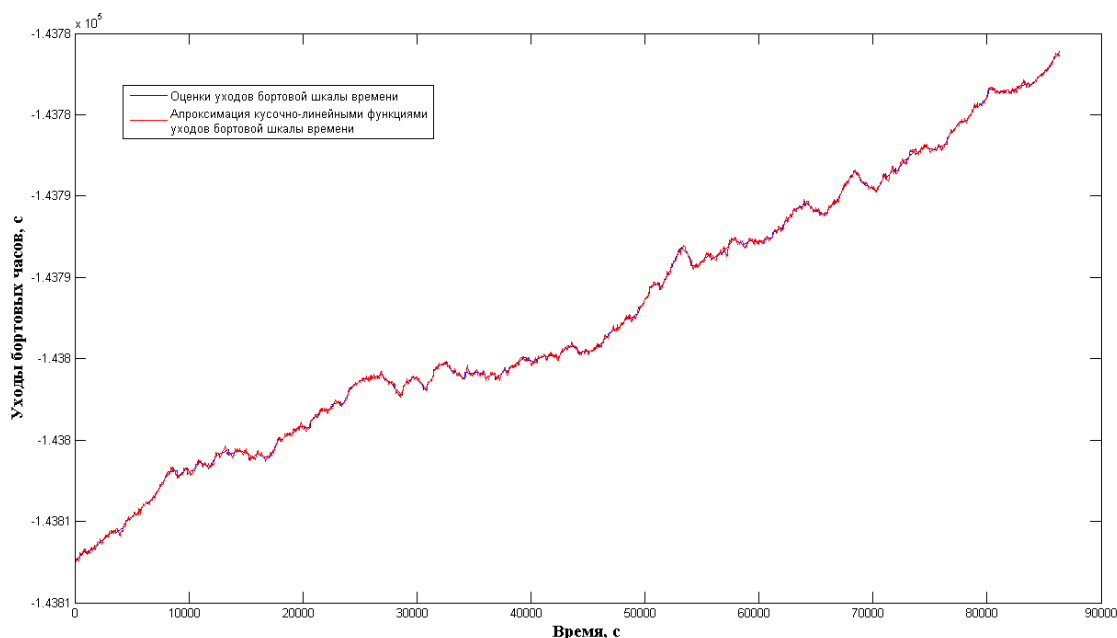


Рисунок 4.8 — Текущие уходы бортовых часов спутника № 715

Как обсуждалось в главе 2, нестабильность частоты часов состоит из долговременной и кратковременной составляющих. Для выделения из оценок текущих уходов бортовых часов спутника № 716 (рисунок 4.8) на суточном интервале за 20.06.2016 автором были построены функция линейно-кусочного вида и некоторый шумовой процесс (рисунок 4.9) согласно построенной математической модели из уравнения (2.3).

Параметры долговременной нестабильности рассчитаны на основе функции полиномиального вида первого порядка с шагом расчета в 15 минут. Крат-

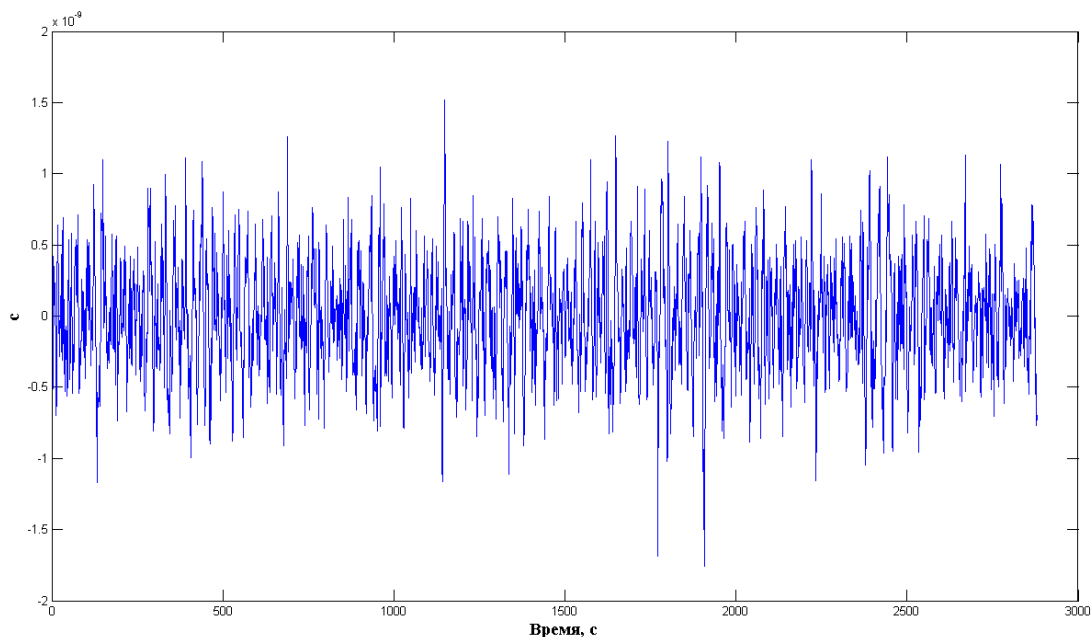


Рисунок 4.9 — Кратковременная составляющая нестабильности частоты часов спутника № 715

ковременная нестабильность представляется центрированным случайным процессом, т.к. брался суточный интервал оценивания.

Полученные результаты оценивания погрешностей бортовых часов сравнивались с аналогичными результатами, предоставляемые информационно-аналитическим центром ГЛОНАСС [50]. Подобное обстоятельство позволило автору утверждать, что разработанный алгоритм и соответствующее программное решение решает поставленную задачу адекватно предъявляемым требованиям [51], обеспечение позволяет получать оценки погрешностей и контролировать эфемеридно-временную информацию для орбитальной группировки ГЛОНАСС.

4.3 Алгоритмы сравнения частот пространственно-разнесенных стандартов частоты по данным беззапросных фазовых измерений

Оценка отклонения частоты является вторым параметром долговременной составляющей нестабильности частоты. В методическом плане оценивание частот генераторов по данным псевдодальномерных измерений описывается проще, чем сравнение шкал времени часов: проблема, связанная с разрешением

неоднозначности фазовых измерений решается путем использования разностных измерений. Оценивание отклонения частоты выполнялось при следующих условиях:

— использование в качестве опорного стандарта частоты вторичный эталон времени и частоты ВЭТ 1-19;

— прием радиосигналов ГНСС на частотах L1 и L2 осуществлялось одноподобными приемниками Javad Sigma с известными метрологическими характеристиками;

— обработка измерений с радиовидимого НС одновременно в двух пунктах (ГСВЧ ФГУП «СНИИМ», г. Новосибирск и п. Шебалино / перевал Семинский, республика Алтай).

Алгоритм оценивания заключается в следующих шагах:

1) с помощью метода PPP оцениваются координаты спутников, пункта, участвующих в измерительном процессе, и тропосферная задержка;

2) формируются первые разности фазовых измерений на момент времени t_k

$$\Delta\Phi(t_k) = \Phi^A(t_k) - \Phi^B(t_k) = \rho^A(t_k) - \rho^B(t_k) + \Delta T^{AB}(t_k) \cdot c + \Delta N^{AB} \cdot \lambda$$

где $\Phi^A(t_k)$ и $\Phi^B(t_k)$ - результаты фазовых измерений на момент t_k для пунктов А и В;

$\Delta T^{AB}(t_k)$ - отклонение момента шкалы времени пункта А от шкалы времени В;

ΔN^{AB} - разница между целочисленными значениями фазовых неоднозначностей.

3) формируются разности для исключения фазовой неоднозначности ΔN^{AB} на интервале $[t_0; t_k]$

$$\Delta\Phi(t_k) - \Phi(t_0) = \Delta\rho^A(t_k) - \Delta\rho^B(t_k) + \nabla\Delta T^{AB}(t_k) \cdot c$$

где $\nabla\Delta T^{AB}(t_k) = \Delta T^{AB}(t_k) - \Delta T^{AB}(t_0)$

$$\Delta f = \frac{\Delta T^{AB}(t_k) - \Delta T^{AB}(t_0)}{t_k - t_0}$$

- смещение частоты между пунктами А и В [19].

4.4 Анализ проявления влияния гравитационных эффектов на частоту стандарта

Нестабильность частоты КСЧ проявляется как и по причине собственной склонности к нестабильности, так и в силу влияния внешних факторов на работу стандарта. 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.

Во 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 дистанционного зондирования с учетом классических и релятивистских эффектов гравитационного поля Земли и других массивных тел Солнечной системы» с участием автора проводились 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 4.10). На рисунках показана трендовая составляющая к изменению моментов шкал времени, полученная МНК, которая и характеризует значения частот стандарта Ч1-1006 в пунктах нахождения стандарта.

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 се-

кунд, 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 $7,964 \cdot 10^{-14}$. Это основной результат эксперимента.

В эксперименте использовалась орбитальная группировка навигационных спутников GPS, радиовидимая одновременно в г. Новосибирск и в республике Алтай.

Для расчёта орбит навигационных спутников использовались финальные эфемериды службы IGS. В качестве иллюстрации приведены графики измерения моментов шкал времени стандарта частоты Ч1-1006 в поселке Шебалино и на Семинском перевале (рисунок 4.10) в близких температурных диапазонах на период проведения измерений с 22.06.2015 г. по 24.06.2015 г.

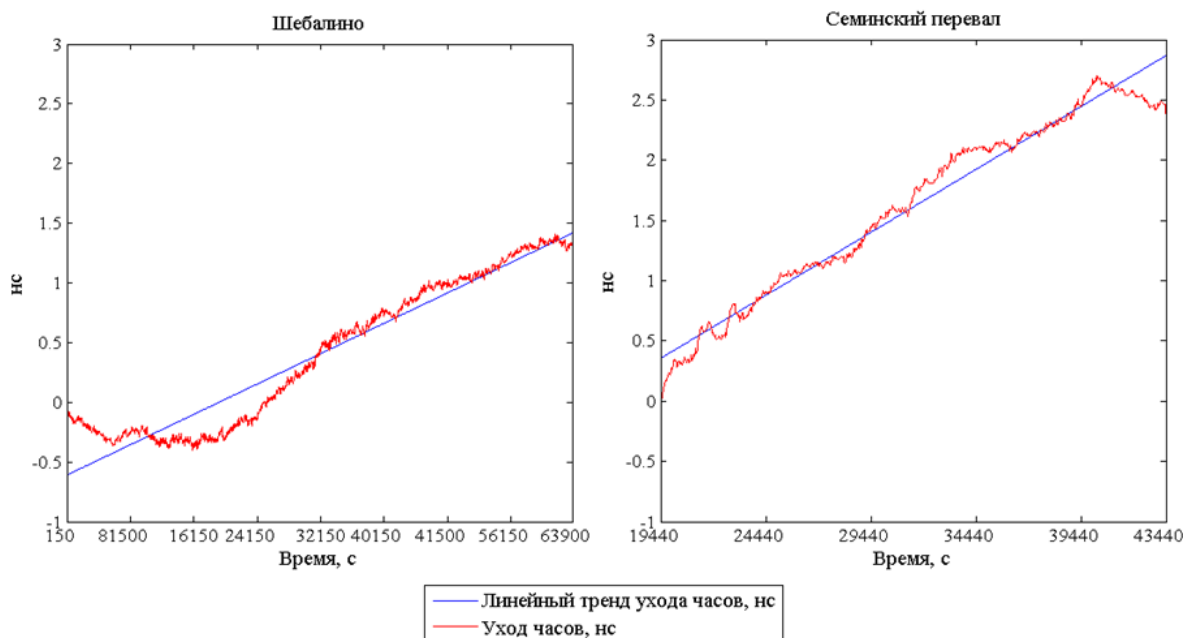


Рисунок 4.10 — Отклонения перевозимого водородного стандарта Ч1-1006

В эксперименте по оцениванию изменений частоты водородного стандарта частоты типа Ч1-1006, связанных с перемещением этого стандарта на высоту около 1000 метров, выполнялись синхронные фазовые траекторные измерения по навигационным спутникам ГНСС. Результаты обработки фазовых траекторных измерений с помощью методики, разработанной в ФГУП «СНИИМ», показали что изменение частоты стандарта Ч1-1006, связанное с его перемещением и измеренное в системе вторичного эталона ВЭТ 1-19, составило $7,964 \cdot 10^{-14}$. Полученное значение хорошо согласуется с результатами аналитических расчетов [19], таким образом автор подтвердил работоспособность и эффективность

разработанной методики оценивания частоты пространственно-разнесенных часов по данным фазовых измерений, позволяющих выявить тонкие эффекты в оценивании частоты релятивистского происхождения.

В эксперименте использовалась орбитальная группировка навигационных спутников GPS и ГЛОНАСС, радиовидимая одновременно в г. Новосибирск и в республике Алтай.

Для расчёта орбит навигационных спутников использовались финальные эфемериды службы IGS. Для оценивания координат стандарта Ч1-1006 использовались ионосферосвободные комбинации $P3$, $L3$. Для оценивания уходов шкалы времени применялась ионосферосвободная фазовая составляющая $L3$. Для компенсации тропосферной задержки применялась модель функции отображения GMF [30]. Зенитные тропосферные задержки по радиотрассам вводились в разряд оцениваемых параметров.

4.5 Перспективы использования разработанных методов и алгоритмов оценивания параметров нестабильности часов в региональной системе дифференциальной коррекции и мониторинга навигационного поля ГЛОНАСС/GPS Новосибирской области

В Российской Федерации в настоящее время создаются широкозонная, региональные и локальные системы функциональных дополнений. Функционально объединенные эти системы образуют Федеральную систему дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ), имеющую трехуровневую систему, которая позволяет обеспечить все категории потребителей ГНСС-услуг дополнительной информацией, при этом каждый уровень является самостоятельной подсистемой, способной автономно решать задачи выработки и передачи корректирующей информации и сообщений о состоянии систем ГЛОНАСС и GPS. СДКМ состоит из следующих компонентов:

- сети пунктов сбора измерений, расположенных на территории РФ;
- Центра дифференциальной коррекции и мониторинга;
- подсистемами информационного обмена;
- средств доставки информации целостности навигационной системы и корректирующей информации [76].

СДКМ является широкозонным функциональным дополнением к глобальным навигационным спутниковым системам и предназначается для решения следующих задач:

1 мониторинг качества навигационных характеристик ГНСС ГЛОНАСС и GPS и оповещение потребителя о возможных ухудшениях в навигационном обслуживании;

2 расчет корректирующей информации (КИ), включающей информации о положениях бортовых шкал времен НС обеспечивающей навигационные определения потребителей с высокой точностью [76].

Региональная дифференциальная подсистема НСО предназначена для навигационного обеспечения потребителей Новосибирской области. Станции мониторинга, расположенные в опорных пунктах, принимают сигналы НС ГЛОНАСС и GPS в диапазонах L1 и L2, производят измерения по фазе и коду несущей, и передают в региональный центр мониторинга. В центре производится предварительная обработка полученных измерений и формируется массив сообщений, содержащий корректирующую информацию для всех НС. Массив сообщений распространяется и передаётся потребителю.

Региональная система высокоточного координатно-временное и навигационное обеспечения (КВНО) призвана стать основой реализации единого методологического, технического и системного подхода к созданию, развёртыванию и эксплуатации комплекса средств, размещенных на территории РФ [valbib6].

В рамках федеральной целевой программы «Глобальная навигационная система» (ОКР «СМ-ГЛОНАСС») станции мониторинга размещаются на пунктах метрологических институтов Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, расположенные в пос. Менделеево, Московской области, городах Новосибирск, Хабаровск и которые являются пунктами метрологического контроля в структуре Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли. Технические возможности институтов, их географическое положение, высокоточное прецизионное оборудование, функционирование вторичного эталона времени и частоты ВЭТ 1-19 определяют целесообразность включения их в базовую инфраструктуру региональных систем высокоточного КВНО.

В качестве опорного пункта региональная сеть станций мониторинга в Новосибирской области использует пункт метрологического контроля ГСВЧ ФГУП

«СНИИМ», что позволило обеспечить пользователей высокоточной корректирующей информацией к сигналам ГНСС ГЛОНАСС и GPS.

Станции размещены в крупных населённых пунктах Новосибирской области, как показано на рисунке 4.11, геодезические координаты которых определены и далее постоянно уточняются с использованием получаемых ими ГЛОНАСС/GPS навигационных данных в Центр Федеральной системы широкозонной дифференциальной коррекции и мониторинга СНС. Данные с опорных пунктов новосибирской сети станций мониторинга передаются в Региональный центр обработки навигационных данных и формирования региональной корректирующей информации.



Рисунок 4.11 — Система высокоточного навигационно-временного обеспечения Новосибирской области

При формировании корректирующей информации используются уточненные оценки текущих бортовых шкал времени ГЛОНАСС и GPS, рассчитанные на основе разработанных алгоритмов оценивания параметров неустойчивости частоты бортовых часов по данным траекторных измерений, а также уточненные эфемериды НС, полученные ФГУП «СНИИМ».

Для организации пункта метрологического контроля навигационного поля ГЛОНАСС в системе высокоточного позиционирования Новосибирской области

предлагается активы ФГУП «СНИИМ». Технические возможности пункта обеспечивают необходимые условия для решения рассматриваемой задачи:

1 Государственный вторичный эталон времени и частоты ВЭТ 1-19. Как указывалось в п. 1.1, проблемы в оценивании уходов бортовых часов по данным траекторных измерений заключаются в сложности разделения этих уходов от уходов часов приемной аппаратуры. Разделение возможно при обеспечении априорно известного значения ухода часов приёмной аппаратурой. Это условие осуществляется при использовании в качестве опорной шкалы времени вторичного эталона времени и частоты ВЭТ 1-19. Шкала этого эталона согласованна со шкалой Госэталона UTC(SU) с высокой точностью.

2 Приёмник навигационных сигналов Javad Legacy, Javad Sigma с установленным антенным модулем на реперном пункте NOVJ и NOVМ с открытыми координатами, определёнными в СК ПЗ-90.11 и WGS-84.

3 SNTP сервер для передачи момента шкалы времени по Интернет каналам.

4 Система бесперебойного питания аппаратуры.

Так же выгодное географическое положение метрологического пункта ФГУП «СНИИМ», позволяющее наблюдать наибольшее количество НКА в зоне радиовидимости над территорией РФ и принимать транслируемые ими навигационные сообщения. Решения задачи контроля бортовых шкал времени, расчёт и выдача дифференциальных поправок для потребителей навигационных услуг решена при непосредственном участии автора (Приложение В). Передача обработанной частотно-временной информации осуществляется с SNTP-сервера ФГУП «СНИИМ» по каналам Интернет. Привлечение рассчитанных поправок увеличивает точность КВО до сантиметровой точности, что отвечает требованиям специальных пользователей.

Точность и достоверность определения поправок к бортовым эфемеридам и ЧВП обеспечиваются обработкой всех доступных к моменту решения измерений, собираемых в квазереальном времени с сети базовых ГНСС станций. Эти поправки не имеют жестких ограничений по частоте обновления, что позволяет значительно сократить время прогноза и получать наиболее точную эфемеридно-временную информацию (ЭВИ) в реальном времени. Сами поправки представляют собой разность между полученной оценкой и бортовой ЭВИ, транслируемой с НС.

Решение задачи оценки уходов бортовых часов НС и контроля правильности транслируемых, бортовых ЧВП на основе разработанных автором программных приложений пункта метрологического контроля ГСВЧ ФГУП «СНИИМ» позволяет повысить точность решения задач КВО потребителя навигационных услуг.

4.6 Основные результаты и выводы

4.6.1 Проведенный анализ показал, что точность результатов контроля бортовых шкал может быть повышена за счет:

- применения алгоритмов предварительной обработки результатов измерений с целью фильтрации шумов и качественного подавления влияющих факторов,
- привлечения результатов фазовых измерений,
- использования апостериорных эфемерид для расчетов геометрических дальностей от спутников до антенн метрологического пункта.

4.6.2 Предложена методика контроля текущих параметров отклонения бортовых шкал времени навигационных спутников от эталонных шкал по результатам траекторных фазовых измерений в частотных диапазонах ГЛОНАСС L1 и L2. Эффективность оценок положения бортовых шкал достигнута за счет применения технологии PPP.

Сложность реализации методики заключалась в том, что фазовые измерения содержат неоднозначности, а также существует вероятность потери фазовых циклов и, вследствие этого, появление скачков значений фазы несущей. Однако фазовые измерения обеспечивают увеличение точности оценивания уходов бортовых часов по сравнению с кодовыми.

4.6.3 Результаты контроля бортовых шкал времени орбитальной группировки ГНСС на базе метрологического пункта Государственной службы времени и частоты «СНИИМ» позволяют улучшить метрологические характеристики корректирующих поправок, формируемых сетью активных базовых станций Новосибирской области.

Заключение

В диссертационной работе получены следующие основные результаты.

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 изменения 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.

Список сокращений и условных обозначений

| | |
|-----------------|--|
| БАМИ | бортовая аппаратура межспутниковых измерений |
| БИС | беззапросная измерительная станция |
| ВЭТ 1-19 | Государственный вторичный эталон времени, частоты и момента шкалы времени |
| ГЛОНАСС | отечественная глобальная навигационная спутниковая система |
| ГНСС | глобальная навигационная спутниковая система |
| ГСВЧ | Государственная служба времени и частоты |
| КВО | координатно-временное обеспечение |
| КВНО | координатно-временные и навигационные определения |
| КСЧ | квантовый стандарт частоты |
| МНК | метод наименьших квадратов |
| НКУ | наземный комплекс управления |
| НС | навигационный спутник |
| ОМНК | обобщенный метод наименьших квадратов |
| СДКМ | система дифференциальной коррекции и мониторинга |
| СК | система координат |
| СКО | среднеквадратическое отклонение |
| СВОЭВП | система высокоточного определения эфемеридно-временных параметров |
| ФК | фильтр Калмана |
| ЦС | Центральный синхронизатор |
| ЧВИ | частотно-временная информация |
| ЧВП | частотно-временные поправки |
| ЭВИ | эфемеридно-временная информация |
| ЭВО | эфемеридно-временное обеспечение |
| AIUB | Astronomisches Institut - Universitat Bern — Астрономический институт университета Берна |
| Galileo | европейская система ГНСС |
| GMF | Global Mapping Function |
| GPS | Global Positioning System (USA) — глобальная навигационная система |
| ESOC | European Space Operations Centre — Европейский космический центр |

- IERS** International Earth Rotation and Reference Systems Service — Международная служба вращения Земли (МСВЗ)
- IGS** International GNSS Service — Международная служба ГНСС
- ITRF** The International Terrestrial Reference Frame — Международная земная система координат
- MEDLL** Multipath Elimination Delay Lock Loop
- MET** Multipath Elimination Technology
- PPP** Precise Point Positioning -метод точного позиционирования
- PPS** Pulse Per Second — секундный импульс
- UTC** Coordinated Universal Time — Всемирное координированное время
- UTC(SU)** шкала универсального координированного времени государственного первичного эталона Российской Федерации

Список литературы

1. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. — 5.1-е изд. — Москва, 2008. — С. 74.
2. 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.
3. *Пасынков В. В., Данилюк А. Ю., Забокрицкий А. В.* Эфемеридно-временное обеспечение ГНСС ГЛОНАСС // Труды ИПА РАН. — 2009. — № 20. — С. 66–100.
4. *Шебшаевич В.* Сетевые спутниковые радионавигационные системы. — 1993. — С. 408.
5. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перов, В. Н. Харисов. — Москва : Радиотехника, 2010. — С. 688.
6. Спутниковые системы мониторинга / В. В. Малышев [и др.] ; под ред. В. Малышев. — Москва : Издательство МАИ, 2000. — С. 568.
7. *Blair B. E.* TIME AND FREQUENCY : Theory and Fundamentals. — 1974. — P. 459.
8. Измерение времени. Основы GPS / под ред. К. Одуан, Б. Гино. — Москва : Техносфера, 2002. — С. 385.
9. *Rutman J.* Characterization of Phase and Frequency Instabilities in Precision Frequency Sources: Fifteen Years of Progress // Proceedings of the IEEE. — 1978. — Vol. 66. — Pp. 1048–1075.
10. *Линдси У. С., Чжа-Мин Ц.* Теория неустойчивости генераторов, основанная на структурных функциях // ТИИЭР. — 1976. — № 12. — С. 5–21.

11. Пучков В. Ю., Шебшаевич В. С. Учет релятивистских и гравитационных эффектов при обработке результатов измерений в системе NAVSTAR // За-рубежная радиоэлектроника. — 1989. — Т. 1. — С. 54–60.
12. Создание сети беззапросных измерительных систем для эфемеридно-вре-менного обеспечения системы ГЛОНАСС / В. А. Бартедьев [и др.] // Материалы Всероссийской научно-технической конференции "Навигаци-онные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека". Сиб.Гос. аэрокосмический университет. — Красноярск, 2007. — С. 156–159.
13. Time and Frequency Measurements Using the Global Positioning System / M. Lombardi [et al.] // Metrology. — 2001. — Pp. 26–33.
14. ГОСТ 8.129-2013 Государственная система обеспечения единства измере-ний. Государственная поверочная схема для средств измерений времени и частоты. — Москва : Стандартинформ, 2014. — С. 8.
15. Ashby N. Relativity in the Global Positioning // Living Reviews in Relativity. — 2003. — Vol. 6, no. 1.
16. 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.
17. 50 лет Российскому институту радионавигации и времени. — Санкт-Петер-бург : Российский институт радионавигации и времени (РИРВ), 2007. — С. 240.
18. Kouba J. Relativistic Time Transformations in GPS // GPS Solutions. — 2002. — Vol. 5, no. 4. — Pp. 1–9. — URL: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/PL00012907>.
19. Ханькова Е. А., Толстиков А. С., Карауш А. А. Оценивание частоты про-странственно-разнесенных часов на основе фазовых ГНСС измерений // Успехи современной радиоэлектроники. — 2015. — Т. 1, № 10. — С. 82–84.
20. Barnes J. A., Chi A. R., Cutler L. S. Characterization of frequency stability // IEEE transactions on. — 1971. — No. 2.
21. Barnes J. A. Atomic timekeeping and the statistics of precision signal gener-ators // Proceedings of the IEEE. — 1966. — Vol. 54, no. 2. — Pp. 207–220.

22. *Howe D. A., Allan D. W., Barnes J. A.* Properties of signal sources and measurement methods // Thirty Fifth Annual Frequency Control Symposium. — 1981. — Pp. 14–60.
23. *Greenhall C. A.* Total variance, an estimator of long-term frequency stability // IEEE transactions on Ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. — 1999. — Vol. 46, no. 5. — Pp. 1–19. — URL: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs%5C_all.jsp?arnumber=796124.
24. *Vig J. R., Meeker T. R.* The aging of bulk acoustic wave resonators, filters and oscillators // Proceedings of the 45th Annual Symposium on Frequency Control. — 1991. — Pp. 77–101.
25. IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology — Random Instabilities. — New York, 1999. — P. 31.
26. *Allan D. W.* Statistics of Atomic Frequency Standards // Proceedings of the IEEE. — 1966. — Vol. 54, no. 2. — Pp. 221–230. — URL: http://www.google.com/patents/US6320472%20http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs%5C_all.jsp?arnumber=1446564.
27. *Riley W.* Handbook of Frequency Stability Analysis. — 2007. — P. 158.
28. *Vernotte F., Zalamansky G., Lantz E.* Time stability characterization and spectral aliasing. Part I: a time-domain approach // Metrologia. — 1998. — Vol. 35, no. 5. — Pp. 723–730. — URL: <http://stacks.iop.org/0026-1394/35/i=5/a=3?key=crossref.9dc9d0b0be9ee142536cacb80e7b0ac5>.
29. *Vernotte F., Zalamansky G., Lantz E.* Time stability characterization and spectral aliasing. Part II: a frequency-domain approach // Metrologia. — 1998. — Vol. 35, no. 5. — Pp. 731–738. — URL: <http://stacks.iop.org/0026-1394/35/i=5/a=4?key=crossref.7def6188b98860e0e7f5d67c61e4c89f>.
30. IERS Conventions / ed. by G. Petit, B. Luzum. — 2010. — P. 179.
31. *Антонович К.* Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Том 1. Т. 1. — Москва : Картгеоцентр, 2005. — С. 334.
32. *Карауш А.* Численные методы // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — 2014. — № 1. — С. 174–178.
33. Параметры Земли 1990 года. — Москва, 2014. — С. 52.

34. *Поваляев А. А.* Спутниковые радионавигационные системы: время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат. — Москва : Радиотехника, 2008. — С. 328.
35. *Springer T.* NAPEOS Mathematical models and algorithms: tech. rep. — 2009. — P. 150.
36. *Blewitt G.* Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2000 km // *Journal of Geophysical Research.* — 1989. — Vol. 94, no. 8. — Pp. 10187–10203.
37. *Антонович К.* Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Том 2. Т. 2. — Москва : Картогеоцентр, 2006. — С. 360.
38. *Blewitt G.* An Automatic Editing Algorithm for GPS Data // *Geophysical Research Letters.* — 1990. — Vol. 17, no. 3. — Pp. 199–202. — URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/GL017i003p00199/full>.
39. Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли / под ред. П. А. Красовский. — Менделеево : ВНИИФТРИ, 2007. — С. 163.
40. *Бартеньев В. А., Гречкосеев А. К.* Перспективы использования межспутниковых измерений для определения орбит и уходов бортовых часов в системе ГЛОНАСС // *Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека».* — Красноярск, 2007. — С. 150–153.
41. Федеральная целевая программа «Глобальная навигационная система. 2007-2011 гг.» — 2007.
42. Федеральная целевая программа «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012 - 2020 годы». — 2011.
43. *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.
44. *Жданюк Б.* Основы статистической обработки траекторных измерений. — 1978. — С. 384.

45. Толстиков А. С. Методы и алгоритмы координатно-временных определений на основе применения спутниковых навигационных технологий: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. — Новосибирск : НГТУ, 2011. — С. 318.
46. Бокс Д., Дженкинс Г. Анализ временных рядов прогноз и управление / под ред. В. Ф. Писаренко. — Москва : Мир, 1974. — С. 406.
47. Ханькова Е. А. Частотно-временная основа координатно-временных определений в ГНСС-технологиях // Геодезия и картография. — 2015. — № 2. — С. 25–30.
48. Ревнивых С. Г. ГЛОНАСС: достижения, перспективы и проблемы развития // Мир измерений. — Москва, 2012. — С. 4–11.
49. Satellite Clock Error and Orbital Solution Error Estimation for Precise Navigation Applications / В. Bidikar [et al.] // Positioning. — 2014. — No. 5. — Pp. 22–26.
50. Информационно-аналитический центр ГЛОНАСС и GPS [Электронный ресурс]. — 2016. — URL: <https://www.glonass-iac.ru/>.
51. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. Системы высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП). — 3.0-е изд. — Москва, 2011. — С. 93.
52. Ханькова Е. А., Толстиков А. С. О метрологическом обеспечении сети активных базовых ГНСС-станций Новосибирской области // Приборы. — 2014. — Т. 171, № 9. — С. 34–38.
53. Предварительная обработка траекторных измерений для оценивания уходов бортовых часов спутников ГЛОНАСС / Е. А. Ханькова [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.
54. 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. Ханькова [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.
55. *Ершов А. А.* Стабильные методы оценки параметров // Автоматика и телемеханика. — 1978. — № 8. — С. 66—100.
 56. *Микешина Н. Г.* Выявление и исключение аномальных значений // Заводская лаборатория. — 1966. — № 3. — С. 310—318.
 57. *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 международ. участ. (Красноярск, 6–8 мая, 2014 г.). — Красноярск: Изд-во СФУ. — 2014. — С. 259—263.
 58. 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.
 59. *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.
 60. *Генике А., Побединский Г.* Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. — Москва : Картгеоцентр, 2004. — С. 355.
 61. *Поваляев Е., Хуторной С.* Системы спутниковой навигации ГЛОНАСС и GPS. Часть 3. Борьба с многлучевостью // Инженерная микроэлектроника. — 2002. — Т. 65, № 2. — С. 23—30.
 62. *Kunysz W.* A Three Dimensional Choke Ring Ground Plane Antenna // NovAtel Inc. Application Note. — 2001. — Pp. 23–30. — URL: http://www.novatel.com/assets/Documents/Papers/3D_choke_ring.pdf.
 63. Multipath Error Reduction in Signal Processing. Proceedings of the 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation / A. Zhdanov [et al.] // ION GPS. — 1999. — Pp. 1217–1224.

64. *Gurtner W., Estey L.* RINEX The Receiver Independent Exchange Format. — 2007. — P. 42.
65. *Толстиков А. С., Карауш А. А.* Оценивание частоты пространственно-разнесенных часов на основе фазовых ГНСС измерений // Успехи современной радиоэлектроники. — 2015. — Т. 10. — С. 82–84.
66. *Донченко С., Крошкин А.* Новый подход к формированию групповой частоты и шкалы атомного времени на ансамбле хранителей // Измерительная техника. — 1989. — № 7. — С. 3–7.
67. *Weis M., Allan D., Pepler T.* A Study of the NBS Time Scale Algorithm // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 1989. — Vol. 38, no. 2. — Pp. 631–635.
68. *Jacques C., Boulanger J. S.* Time scale algorithms for an inhomogeneous group of atomic clocks // Proceedings of the 24th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. — 1993. — Pp. 399–412.
69. *Tryon P., Jones R.* Estimation of Parameters in Models cesium Beam atomic Clocks // Journal of Research of the National of Standards. — 1983. — Vol. 88, no. 1. — Pp. 3–16.
70. *Толстиков А.* Алгоритмы синхронизации пространственно-разнесенных часов по сигналам спутниковых навигационных систем // Метрология. — 2009. — № 9. — С. 25–35.
71. *Сейдж Э.П. М. Д.* Теория оценивания и ее применение в связи и управления. — Москва : Связь, 1976. — С. 496.
72. *Толстиков А.* Алгоритм формирования шкалы группового хранителя времени // Научный вестник НГТУ. — 2010. — Т. 38, № 1. — С. 190–194.
73. *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.
74. *Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление / В. Малышев [и др.].* — Москва : МАИ, 2000. — С. 568.
75. *Zumberge J. F., Heflin M. B.* Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks // Journal of Geophysical Research Atmospheres. — 1997. — Vol. 102, B3. — Pp. 5005–5017.

76. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. Системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ). — 3.0-е изд. — Москва, 2012. — С. 133.
77. *Riley W. J.* THE HADAMARD VARIANCE. — 2006. — URL: <http://www.wiley.com/paper4ht.htm>.

Приложение А

Меры нестабильности частоты квантовых стандартов

В качестве мер применяются статистические параметры на интервале времени. Широко применяется дисперсия или среднеквадратическое отклонение.

Во временной области применяются ширина распределения вероятности частотных отклонений, вариация Аллана, вариация Адамара, их модификации и др. меры. В таблице А.1 представлены характеристики часто используемых мер в области время-частотных измерений.

Таблица А.1 - Меры нестабильности частоты КСЧ

| Тип дисперсии | Математическое представление дисперсии | Характеристика дисперсии |
|-----------------|--|---|
| Стандартная | $s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$ | Не рекомендуется в качестве меры нестабильности, т.к. она не сходится для некоторых видов шумов |
| Вариация Аллана | $\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} [y_{i+1} - y_i]^2$ | Наиболее распространенная мера; сходится для большинства шумов |

Модифици-
рованная
вариация
Аллана

$$Mod\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2m^4(M - 3m + 2)} \cdot \sum_{j=1}^{M-3m+2} \left(\sum_{i=j}^{j+m-1} \left\{ \sum_{k=i}^{i+m-1} [y_{k+m} - y_k] \right\} \right)^2$$

Является модификацией вариации Аллана; усредняет фазу и позволяет различать белый и фликкерный фазовые шумы

Временная
вариация

$$\sigma_x^2(\tau) = (\tau^2/3) \cdot Mod\sigma_y^2(\tau)$$

Основывается на модифицированной вариации Аллана. Используется, чтобы охарактеризовать временную ошибку часов

Вариация
Адамара

$$H\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{6(M-2)} \cdot \sum_{i=1}^{M-2} [y_{i+2} - 2y_{i+1} + y_i]^2$$

Повышает достоверность, нечувствительна к линейному дрейфу частоты. Сходится для фликкерного блуждающего частотного шума ($\alpha = -3$) и случайного набега частотного шума ($\alpha = -4$)

Модифици-
рованная
вариация
Адамара

$$\begin{aligned} ModH\sigma_y^2(\tau) &= \\ &= \sum_{j=1}^{N-4m+1} \sum_{i=j}^{j+m-1} 1/[6m^2\tau^2(N-4m+1)] \cdot \\ &\cdot [x_i - 3x_{i+m} + 3x_{i+2m} - x_{i+3m}]^2 \end{aligned}$$

Общая вари-
ация

$$\begin{aligned} Totvar(\tau) &= \\ &= \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} [y_{i+j+1}^* - y_{i+j}^*]^2, \\ y_{M+1}^* &= y_{M+1-j} \end{aligned}$$

Вариация
Theo1

$$\begin{aligned} Theo1(m, \tau, N) &= \frac{1}{0,75 \cdot (N-m)(m\tau_0)^2} \cdot \\ &\cdot \sum_{i=1}^{N-m} \sum_{\delta=0}^{m/2-1} \frac{1}{\left(\frac{m}{2} - \delta\right)} \cdot \\ &\cdot \left[(x_i - x_{i-\frac{\delta+m}{2}}) + (x_{i+m} - x_{i+\frac{\delta+m}{2}}) \right]^2 \end{aligned}$$

Полезна для анали-
за неустойчивости
частоты, в тех
случаях, когда это
было необходимо
проводить различие
между кратковре-
менным белым
и фликкерным
фазовыми шума-
ми при наличии
 $\alpha = -3, \alpha = -4$

Имеет высокую до-
стоверность на дли-
тельном интервале
усреднения за счет
расширенного набо-
ра данных, чем для
вариации Аллана

Имеет высокую
достоверность для
долговременной
неустойчивости
частоты

Стандартная дисперсия. Классическая N-выборочная или стандартная ва-
риация определяется как

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (y_i - \bar{y})^2,$$

где y_i - значение относительной частоты из N выборки, а \bar{y} - среднее значение
частоты. Эта вариация не рекомендуется в качестве меры неустойчивости ча-

стоты, потому что она не сходится для некоторых типов шумов, обычно встречающихся в источниках частоты. Проблема стандартной вариации связана с его использованием отклонений от среднего, которое не является стационарным для нескольких типов расхождения шума [27]. Эта проблема может быть решена путем использования первой разности значений относительной частоты (второй разности фаз), как описано для дисперсии Аллана ниже.

Дисперсия Аллана. Является наиболее распространенной мерой нестабильности частоты во временной области. Дисперсия Аллана - это мера флуктуации относительной частоты и имеет преимущество по сравнению со стандартной дисперсией в том, что сходится для большинства типов шумов часов.

Дисперсия Аллана или двухвыборочная дисперсия является стандартной мерой стабильности частоты во временной области [26]. Она определяется как

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} [y_{i+1} - y_i]^2,$$

где y_i является i -ое из M средних значений относительной частоты на интервале измерений τ .

Выражая в фазовых данных, вариация Аллана может быть рассчитана как

$$\sigma_x^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2)\tau^2} \sum_{i=1}^{M-1} [x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i]^2,$$

где x_i - это i -ое из $N = M + 1$ значения фазы, расположенные на интервале измерений τ .

В настоящее время наиболее распространённой мерой является дисперсия Аллана, т.к. она не требует большого объёма данных и обладает простотой в использовании.

Вариация Адамара. Дисперсия Адамара основывается на преобразовании Адамара. В качестве спектрального оценивания, преобразование Адамара имеет более высокое разрешение, чем дисперсия Аллана, так как эквивалентная шумовая полоса Адамара и Аллана спектрального окна $1.2337N^{-1} \tau^{-1}$ и $0,476 \tau^{-1}$ соответственно. Для целей во временной области характеристике стабильность частоты, наиболее важным преимуществом дисперсии Адамара является его нечувствительность к линейному дрейфу частоты, что делает его особенно полезным для анализа рубидиевых атомных часов. Он также используется как один из компонентов во временной области многовариантность анализа, и связан с 3-й функции структуры фазового шума [77].

Вариация Адамара является 3-выборочной дисперсией с биномиально-весовыми коэффициентами, которая похожа на 2-выборочную дисперсию Аллана. В нем рассматриваются 2-й разницы дробной частоты, 3-й разности фаз вариаций. Из-за этого дисперсия Адамара $\sigma_H^2(\tau)$ сходится на фликкерном шуме блуждания частоты ($\alpha = 3$) и случайном набеге частоты ($\alpha = 4$) степенная типов шума (таблица А.1). Это также не зависит от линейного дрейфа частоты. Для частот данных, дисперсия Адамара определяется как:

$$\sigma_H^2(\tau) = \frac{1}{6(M-2)} \sum_{i=1}^{M-2} [y_{i+2} - 2y_{i+1} + y_i]^2,$$

где y_i - M дробные значения частоты на интервале времени τ .

Дисперсия Адамара берет на себя дополнительную вычислительную нагрузку, потому что она использует третью разность фаз.

Приложение Б

Влияние релятивистских эффектов на частоту бортовых часов

Релятивистские эффекты являются причиной замедления хода бортовых часов примерно на 38 мкс в сутки.

Принято разделять релятивистские эффекты в ГНСС на два вида:

1) Постоянная составляющая, представляющая собой смещение частоты часов, компенсируется как пропорциональное смещение частоты для всех стандартов частоты спутников ГЛОНАСС $\Delta f/f = -4,36 \cdot 10^{-10}$ и GPS $\Delta f/f = -4,47 \cdot 10^{-10}$ согласно ИКД GPS. Эта постоянная поправка незначительно изменяется от спутника к спутнику, так как зависит от главной полуоси орбиты, служащей причиной смещения часов наблюдаемого спутника.

2) Периодическая часть, которая главным образом зависит от эксцентриситета орбиты, в равной степени соответствует общим и специальным релятивистским эффектам (отклонение высоты и скорости спутника от средних значений). Величина специального релятивистского эффекта (вызываемая средней скоростью спутника) обычно включается в постоянную часть как указано выше.

Общепринятая периодическая погрешность, применяемая всеми потребителями высокой точности GPS, рассчитывается как

$$\Delta t^{per} = -\frac{2}{c^2} \sqrt{a \cdot GM} \cdot e \cdot \sin E$$

где a , e и E - оскулирующие главные полуоси, эксцентриситет и эксцентрисическая (угловая) аномалия орбиты спутника GPS,

c - скорость света,

GM - это произведение гравитационной постоянной и массы Земли.

Движущиеся бортовые часы спутника со временем T_{sv} связаны с номинальной шкалой времени системы ГЛОНАСС преобразованием, полученным согласно пространственно-временной конвенции и общей теории относительности

$$dT_{sv}/dt = 1 - [V(x,y,z) - W_0 + \Delta V(x,y,z) + v^2/2] / c^2 \quad (\text{Б.1})$$

где V - гравитационные и приливные потенциалы Земли, ΔV - гравитационные и приливные потенциалы из-за Луны и Солнца, в положении часов (x,y,z) и скоростью часов v ,

W_0 - потенциал геоида от среднего уровня моря, является константой и эквивалентен среднему радиусу $R_0 = GM/W_0$.

В уравнении (Б.1) гравитационный потенциал Земли описывается как

$$V(x, y, z) = GM/r - R,$$

потенциал возмущения R имеет вид:

$$R = GM \frac{a_E^2}{r^3} J_2 \left(-\frac{3}{4} \sin^2 i \cos 2u + \frac{3}{4} \sin^2 i - \frac{1}{2} \right)$$

где i и u – отклонение орбит и аргумент широты $u = (\omega + f)$, т.е. сумма истинной аномалии f и угла перигея ω .

Квадрат скорости спутника определяется из известных отношений кеплеровских орбит движения

$$v^2 = GM (2/r - 1/a)$$

После интегрирования уравнения Б.1, получаем абсолютную релятивистскую временную поправку, которая имеет уровень точности 10^{-18} :

$$t = T_{sv} - \Delta t^{rel} = T_{sv} - \frac{GM}{c^2} \left\{ (1/R_0) t + \int [1/(2a) - 2/r + R/GM - \Delta V/GM] dt \right\}. \quad (Б.2)$$

На уровне пикосекунд потенциалом прилива Луны, Солнца и других планет $\Delta V(x, y, z)$ можно пренебречь.

Первые два члена интеграла из (Б.2) содержат главную полуось a и радиус r орбиты спутника и определяются с помощью численного интегрирования орбит. Также наиболее значительные возмущения орбит ГЛОНАСС вызывается влиянием второй зональной гармоники J_2 . Следующие наиболее значительные возмущения на порядок меньше и возникают в результате притяжения Солнца и Луны. Остальные возмущения орбит спутников ещё более меньшего порядка, чем от Луны и Солнца. Для обеспечения определения положения часов точности в пс возмущения орбит Солнца/Луны $\Delta V(x, y, z)$ также необходимы.

Приложение В

Акты внедрения



«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. директора ФГУП «СНИИМ»

Шувалов Г.В.

2014 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Е. А. Ханьковой, выполненной на тему «Разработка и исследование алгоритмов оценивания параметров нестабильности бортовых часов навигационных спутников ГЛОНАСС по данным траекторных измерений»


Настоящим актом удостоверяется, что результаты диссертационных исследований Е.А. Ханьковой внедрены и использованы в работе федерального государственного унитарного предприятия «Сибирский государственный орден Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии» для решения задач контроля частотно-временных параметров навигационного поля ГЛОНАСС на базе Государственной службы измерения времени, частоты и определения параметров вращения Земли.

Основные результаты диссертационной работы были получены при выполнении СЧ ОКР «НКУ ОЦЕНКА СНИИМ», сделанной в соответствии с требованиями ТЗ № 150-8/148 «Анализ точностных характеристик ИТНП БИС 14Ц161 на этапе подготовки к проведению комплексных испытаний и МВИ сети 14Ц160» в периоды с 15.03.2011 по 31.05.2011, и при разработке научно-технического отчета о выполнении СЧ ОКР «НКУ ГЛОНАСС» в рамках федеральной целевой программы «Глобальная навигационная система», также при выполнении этапа 2 СЧ ОКР «Модернизация комплексов хранения национальной шкалы времени UTC(SU) в интересах достижения заданных тактико-технических характеристик системы ГЛОНАСС в части вторичного эталонно единиц времени и частоты ВЭТ 1-19» для контроля бортовых шкал времени навигационных спутников орбитальной группировки ГЛОНАСС в рамках федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 гг.».

Зам. начальника отдела

Томилов А.С.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «СГУГиТ» В.И. Обиденко« 10 »  2015 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационных исследований Е.А. Ханьковой в учебный процесс

Результаты диссертационной работы Е.А. Ханьковой на тему «Разработка и исследование алгоритмов оценивания параметров нестабильности бортовых часов навигационных спутников ГЛОНАСС по данным траекторных измерений» включают в себя материалы СЧ ОКР «НКУ ГЛОНАСС» в рамках федеральной целевой программы «Глобальная навигационная система», выполняемых при непосредственном участии автора.

Материалы выполненных диссертационных исследований в части планирования и организации сеансов траекторных измерений, а также их обработки, с помощью пакета программ ModBis 24 (программный имитатор псевдодальномерных измерений по ГНСС ГЛОНАСС и GPS) внедрены в учебный процесс на основании рекомендации кафедры «Метрология и технология оптического производства» (протокол № 19 от 6 февраля 2015 г.), а именно:

– в лекционных курсах, практических занятиях и лабораторном практикуме по дисциплинам «Планирование и организация эксперимента» и «Общая теория измерений»;

– в дипломном проектировании студентов 5-го курса, выпускаемых по специальности 200501 – «Метрология и метрологическое обеспечение».

Зав. кафедрой метрологии и
технологии оптического производства,
д.т.н.



О.В. Минин

Директор института оптики
и оптических технологий,
д.э.н., доцент



А.В. Шабурова

«УТВЕРЖДАЮ»

Руководитель ГБУ НСО «ЦНГТ НСО»


 Новиков С.В.
 « 12 » 03 2014



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Е.А. Ханьковой, выполненной на тему «Разработка и исследование алгоритмов оценивания параметров нестабильности бортовых часов навигационных спутников ГЛОНАСС по данным траекторных измерений»

Настоящим актом удостоверяется, что результаты диссертационных исследований Е.А. Ханьковой внедрены и используются в текущей работе государственного бюджетного учреждения Новосибирской области «Центр навигационных и геоинформационных технологий Новосибирской области» в виде частотно-временных поправок, компенсирующих уходы бортовых шкал времени навигационных спутников ГНСС. Положения моментов бортовых шкал спутников ГНСС оцениваются с помощью методик и алгоритмов, в создании которых Е.А. Ханькова принимала непосредственное участие, разработанных авторским коллективом под руководством д.т.н. А.С. Толстикова в Сибирском НИИ метрологии (ФГУП "СНИИМ", г. Новосибирск)

Передача данных координатно-временных определений от станции дифференциальной коррекции и мониторинга метрологического пункта ГСВЧ ФГУП "СНИИМ" производится в соответствии с Соглашением №30 от 29 июля 2014 года «О создании единого навигационно-информационного и координатно-временного пространства Новосибирской области»

Начальник отдела ЭИС



Сасов Р.Ю.