

Бояркеева Ольга Владимировна

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ БЕЗЗАПРОСНЫХ ТРАЕКТОРНЫХ  
ИЗМЕРЕНИЙ ПО НАВИГАЦИОННЫМ СПУТНИКАМ ГЛОНАСС

05.11.15 – «Метрология и метрологическое обеспечение»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск 2011

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия» и в Сибирском ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательском институте метрологии (ФГУП «СНИИМ»).

Научный руководитель – кандидат технических наук  
Толстикова Александр Сергеевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Пальчун Юрий Анатольевич;

кандидат технических наук  
Серошкинов Геннадий Васильевич.

Ведущая организация – ФГБОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» (г. Красноярск).

Защита состоится 15 декабря 2011 г. в 11-00 час. на заседании диссертационного совета ДМ 212.251.01 при ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия» (СГГА) по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плеханова, д. 10, ауд. 403.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «СГГА».

Автореферат разослан 14 ноября 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного  
совета



Симонова Г.В.

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.  
Подписано в печать 08.11.2011. Формат 60 × 84 1/16.  
Усл. печ. л. 1,10. Тираж 100 экз. Заказ .  
Редакционно-издательский отдел СГГА  
630108, Новосибирск, 108, Плеханова, 10.  
Отпечатано в картопечатной лаборатории СГГА  
630108, Новосибирск, 108, Плеханова, 8.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность темы*

Повышение конкурентной способности отечественной спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС, повышение точности и надежности координатно-временных определений на основе применения ГЛОНАСС обеспечивается за счет привлечения новых измерительных технологий.

В соответствии с федеральной целевой программой «Глобальная спутниковая навигационная система» важнейший сегмент космического комплекса эфемеридно-временное обеспечение (ЭВО) ГЛОНАСС переводится на беззапросные технологии траекторных измерений. Это значит, что в качестве основного источника исходных данных для формирования эфемеридно-временной информации в ГЛОНАСС будут использоваться результаты траекторных измерений, выполняемых с сети беззапросных измерительных станций (БИС) по навигационным спутникам (НС) ГЛОНАСС.

Сама технология беззапросных траекторных измерений для целей ЭВО ГЛОНАСС является новой и нуждается в отработке методик измерений, определении метрологических характеристик измерительных трактов и исследованиях погрешностей, возникающих в процессе измерений.

Важность совершенствования измерительных технологий, применяемых для целей ЭВО, отмечена в работах ученых: Решетнева М.Ф., Эльясберга П.Е., Жданюка Б.Ф., Шебшаевича В.С., Пасынкова В.В., Лебедева А.А., Данилюка А.Ю., Забокрицкого А.В., Бартенева В.А., Гречкосеева А.К., Кокорина В.И., Гребенникова А.В., Владимирова В.М., Толстикова А.С.

Сложность процесса беззапросных траекторных измерений, зависимость результатов измерений от большого числа факторов не позволяют провести необходимые исследования точностных характеристик беззапросных измерительных трактов на основе тех или иных аналитических соотношений.

Проведенный анализ задачи беззапросных измерений для целей ЭВО привел к выводам о целесообразности применения для таких исследований метода имитационного моделирования. Именно эти вопросы применения метода имитационного моделирования для исследования точности беззапросных траекторных измерений и разработка и использование для таких исследований специального программного имитатора измерительной информации составляет основной предмет диссертационных исследований.

Важность самой задачи исследований точности беззапросных траекторных измерений для целей ЭВО ГЛОНАСС и необходимость в определении метрологических характеристик беззапросных измерительных трактов определяют актуальность темы диссертационных исследований.

*Целью работы* является создание методической основы для исследований точности беззапросных траекторных измерений и разработка программного имитатора измерительной информации, поступающей с сети беззапросных измерительных станций, на которых выполняются траекторные измерения по навигационным спутникам ГЛОНАСС и GPS в интересах формирования эфемеридной информации ГЛОНАСС.

*Задачи исследования.* В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие задачи.

Выполняется анализ факторов, влияющих на точность беззапросных траекторных измерений и выбираются адекватные математические модели:

- для описания движения навигационных спутников и действующих на спутники возмущений;
- для представления факторов, влияющих на результаты траекторных измерений.

Производится обоснованный выбор численных методов для расчета движения орбитальной группировки навигационных спутников и учета факторов, влияющих на точность траекторных измерений.

Выбираются критерии оценки точности траекторных измерений и анализируются метрологические характеристики программного имитатора измерительной информации.

В соответствии с ГОСТ Р 8.563-2009 «Методики (методы) измерений» разрабатывается методика беззапросных траекторных измерений по навигационным спутникам ГЛОНАСС и GPS на основе применения программного имитатора измерительной информации.

*Объектом исследования* является технология беззапросных траекторных измерений, выполняемых для целей эфемеридно-временного обеспечения ГЛОНАСС.

*Предметом исследования* являются:

- составляющие инфраструктуры навигационного комплекса ГЛОНАСС, включающие:

- сегмент эфемеридно-временного обеспечения ГЛОНАСС;
- орбитальную группировку навигационных спутников ГЛОНАСС;
- беззапросные измерительные станции, а также:

- методы и средства имитационного моделирования измерительной информации, поступающей с сети беззапросных измерительных станций по навигационным спутникам ГЛОНАСС и GPS.

*Методы исследования*

Для выполнения поставленных задач в работе использованы методы имитационного моделирования, математического анализа, а также методы математической статистики.

*Научная новизна:*

1) впервые разработан и применяется для отработки технологии беззапросных траекторных измерений программный имитатор измерительной информации, поступающей с сети БИС по НС ГЛОНАСС и НС GPS;

2) на основе применения программного имитатора разработана методика беззапросных траекторных измерений;

3) разработаны предложения по расширению функций физических имитаторов навигационных сигналов за счет привлечения функций программного имитатора измерительной информации, поступающей с сети БИС по НС ГЛОНАСС и НС GPS.

*Основные положения, выносимые на защиту:*

1) применение метода имитационного моделирования беззапросных траекторных измерений, выполненных с сети пространственно-разнесенных беззапросных измерительных станций по орбитальной группировке навигационных спутников ГЛОНАСС в условиях действия влияющих факторов;

2) математические модели влияющих факторов, адекватные методу имитационного моделирования, учитывающие уходы бортовых часов и часов приемной аппаратуры, задержку навигационного сигнала в тропосфере и ионосфере, модель случайного процесса, описывающего проявление многолучевости распространения навигационного сигнала;

3) методика траекторных измерений, выполняемых для целей эфемеридно-временного обеспечения на основе применения программного имитатора измерительной информации;

4) программный имитатор измерительной информации, поступающей с сети БИС, используемый для расчета тропосферных поправок в системе Государственного эталона ВЭТ 1-19.

*Практическая значимость работы* связана с непосредственным участием автора в выполнении составных частей ОКР «Эталон» и ОКР «Метрология» Федеральной целевой программы «Глобальная спутниковая навигационная система» в части отработки технологии беззапросных траекторных измерений и исследования точностных характеристик эфемеридно-временного обеспечения ГЛОНАСС. Эти исследования выполнены методом имитационного моделирования на основе применения программного имитатора измерительной информации.

Материалы диссертационных исследований и разработанный программный имитатор могут быть использованы:

- разработчиками аппаратуры приема навигационных сигналов;
- пользователями аппаратуры приема навигационных сигналов для компенсации факторов, влияющих на точность координатно-временных определений, и для планирования измерительных сессий.

*Достоверность* результатов и выводов работы обеспечена корректностью применения методов математического анализа и математической статистики. Полученные теоретические результаты хорошо согласуются с данными обработки траекторных измерений и с результатами модельных исследований. Достоверность подтверждается обсуждением материалов диссертационной работы на всероссийских и международных конференциях и конгрессах.

*Внедрение результатов работы*

В ФГУП «Сибирский государственный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии» (г. Новосибирск) внедрены и используются:

- программный имитатор «ModBis 24» измерительной информации, поступающей с беззапросных измерительных станций по навигационным спутникам ГЛОНАСС и GPS;

- методика беззапросных траекторных измерений на основе применения программного имитатора «ModBis 24»;

- методика компенсации тропосферных погрешностей беззапросных траекторных измерений на основе программного имитатора «ModBis 24» для предварительной подготовки измерительной информации.

В ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия» (г. Новосибирск) материалы диссертационных исследований использованы в учебном процессе при подготовке курсов лекций по дисциплинам «Общая теория измерений» и «Организация и планирование эксперимента» по специальности 200501 «Метрология и метрологическое обеспечение» и в дипломном проектировании.

*Апробация работы.* Основные результаты работы обсуждались на Международных научных конгрессах «ГЕО-СИБИРЬ» в г. Новосибирске (2008, 2009, 2010, 2011 гг.), на Всероссийской научно-технической конференции с международным участием молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники» в г. Красноярске (2010 г.), на Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» в г. Новосибирске (2010 г.), на Межотраслевой конференции по проблемам новых технологий в г. Миассе (2010 г.).

*Публикации.* По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, из которых 1 статья – в издании из Перечня определенных ВАК Минобрнауки РФ.

*Структура и объем диссертации.* Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 105 наименований, и 2 приложений. Объем диссертации составляет 125 страниц. Работа содержит 20 рисунков и 6 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации. Сформулированы общие задачи и цели диссертационных исследований, определены основные научные результаты, их новизна, практическая значимость.

*В первой главе* обсуждается постановка задачи исследования беззапросных траекторных измерений методами имитационного моделирования.

В настоящее время, в рамках выполнения федеральной целевой программы (ФЦП) «Глобальная спутниковая навигационная система», для целей формирования ЭВО применяется беззапросная технология траекторных измерений. Точность данных измерений определяет эффективность всех задач координатно-временных определений (КВО), выполняемых на основе спутниковых навигационных технологий.

Из-за сложности исследования точности задач КВО наиболее перспективным является применение для этих целей методов имитационного моделирования.

Для этого, в рамках выполнения ОКР «ЭВО» и ОКР «Метрология» ФЦП «ГЛОНАСС» в ФГУП «СНИИМ» при непосредственном участии автора разработан пакет программ под названием «ModBis24» с удобным пользовательским интерфейсом.

Для реализации программного имитатора возникает необходимость в решении следующих задач:

- расчет движения орбитальной группировки НС ГЛОНАСС с учетом действующих на НС возмущений;
- задание сети БИС в гринвичской системе координат;
- расчет геометрических дальностей от НС до БИС;
- имитация факторов, влияющих на точность траекторных измерений.

*Первая задача* связана с расчетом движения орбитальной группировки НС ГЛОНАСС с учетом действующих на НС возмущений.

Движение НС в оскулирующих элементах описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений общего вида:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}(t) = \mathbf{f}[\boldsymbol{\eta}(t), \mathbf{s}(t), \mathbf{w}(t)], \boldsymbol{\eta}(t_0) = \boldsymbol{\eta}_0, \quad (1)$$

где  $\boldsymbol{\eta}(t)$  – 6-мерный вектор оскулирующих элементов орбиты, представляющий собой комбинацию кеплеровых элементов орбиты;  $f(\dots)$  – 6-мерная известная гладкая вектор-функция, допускающая дифференцирование по  $\boldsymbol{\eta}(t), \mathbf{s}(t), \mathbf{w}(t)$ ;  $\mathbf{s}(t)$  – 3-мерный вектор действующих на НС моделируемых возмущений, представляющий собой следующие возмущения  $\mathbf{s}_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, 5$ :  $i = 1$  – возмущение от нецентральности гравитационного поля Земли,  $i = 2, 3$  – возмущения от гравитационного воздействия Луны и Солнца,  $i = 4$  – возмущение от радиационного давления на НС солнечного излучения,  $i = 5$  – немоделируемые возмущения.

Считаем, что возмущения  $\mathbf{s}_1(t)$ ,  $\mathbf{s}_2(t)$ ,  $\mathbf{s}_3(t)$ , могут быть учтены достаточно точно с помощью известных математических моделей. Некомпенсированные составляющие этих возмущений дополняют вектор  $\mathbf{s}_5(t) = \mathbf{w}(t)$ , трактуемый как случайный процесс с известными в ряде случаев вероятностными характеристиками, к которому также относятся погрешности компенсации  $\mathbf{s}_i(t)$ .

*Второй задачей*, возникающей при реализации программного имитатора, является задание сети БИС в гринвичской системе координат. Сеть БИС на основе имитатора «ModBis 24» задается в виде совокупности геоцентрических координат  $\mathbf{u}_{БИС}^T = [x_I, y_I, z_I]$ . Эти координаты определяют положение фазового центра приемного антенного модуля  $I$ -й БИС в геодезических системах ПЗ-90 или WGS -84, связанных с вращающейся Землей.

*Третья задача* заключается в расчете геометрических дальностей  $\rho(\mathbf{u}_C, \mathbf{u}_{БИС})$  от НС до БИС, которые выполняются в соответствии с равенством

$$\rho(\mathbf{u}_C, \mathbf{u}_П) = \sqrt{(x_C - x_П)^2 + (y_C - y_П)^2 + (z_C - z_П)^2}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{u}_C^T = [x_C, y_C, z_C]$ ,  $\mathbf{u}_П^T = [x_П, y_П, z_П]$  – векторы текущих координат НС и потребителя соответственно в инерциальной системе координат. При этом решается задача установления связей между системой оскулирующих элементов, гринвичской и инерциальными системами координат.

В реальных условиях приема в БИС навигационных сигналов от НС измерение геометрических дальностей  $\rho(\mathbf{u}_C, \mathbf{u}_{БИС})$  радиотехническими методами сводится к определению длительности интервала времени, необходимого для прохождения навигационного сигнала от НС до БИС. Этот измеренный интервал времени  $D(t)$ , выраженный в единицах длины и именуемый в дальнейшем «псевдодальностью», связан с геометрической дальностью  $\rho(\mathbf{u}_C, \mathbf{u}_{БИС})$  основным уравнением беззапросных траекторных измерений

$$D(t) = \rho(\mathbf{u}_C, \mathbf{u}_{БИС}) + \sum_{k=1}^{12} p_k(t), \quad (3)$$

где  $p_k(t)$ ,  $k = 1, \dots, 12$  – факторы, влияющие на точность измерений  $\rho(\mathbf{u}_C, \mathbf{u}_{БИС})$  по каждой радиотрассе, выраженные в единицах длины, в частности, факторы, порожденные уходами бортовых часов и часов приемной аппаратуры; задержки навигационного сигнала в ионосферном и тропосферном слоях; смещение фазовых центров передающей и приемной антенн; погрешности, обусловленные релятивистскими эффектами; фактор, связанный с неоднозначностью фазовых измерений; погрешности задания эфемерид спутника; погрешности от многолучевости распространения навигационного сигнала; погрешности случайной природы.

Уравнение (3) положено в основу программного имитатора «ModBis 24».

*Четвертая задача* связана с имитацией факторов, влияющих на точность траекторных измерений, которая подробно описана в главе 2.

Таким образом, в первой главе обоснован выбор метода имитационного моделирования для исследования беззапросных траекторных измерений, разработана структура для построения имитатора, сформулированы правила выбора моделей движения и математических моделей для факторов, влияющих на точность измерений.

Также разработаны предложения по расширению функций физических имитаторов навигационных сигналов за счет привлечения функций программного имитатора измерительной информации «ModBis 24».

*Во второй главе* проведен сравнительный анализ факторов, влияющих на точность траекторных измерений, по степени влияния на результаты измерений и возможности их компенсации.

Целью анализа является выбор адекватных математических моделей, таким образом, чтобы удалось скомпенсировать факторы  $p_k(t)$ , влияющие на точность измерения дальности  $\rho(\mathbf{u}_C, \mathbf{u}_{БИС})$ .

Для описания факторов, связанных с уходом часов потребителя  $p_2(t) = c \cdot \Delta T_{II}(t)$  от номинального момента шкалы времени  $T_{IC}(t)$  и с уходом бортовых часов НС  $p_1(t) = c \cdot \Delta T_C(t)$  (рисунок 1), принята математическая модель нестабильности часов в виде дифференциального уравнения

$$\Delta \dot{T}_{II}(t) = s(t) + w(t), \quad \Delta T_{II}(t_0) = \Delta T_{II0}, \quad t \in [t_0, t_k], \quad (4)$$

связывающего уход часов БИС  $\Delta T_H(t)$  с характеристиками долговременной  $s(t)$  и кратковременной  $w(t)$  нестабильностей частоты генератора часов.

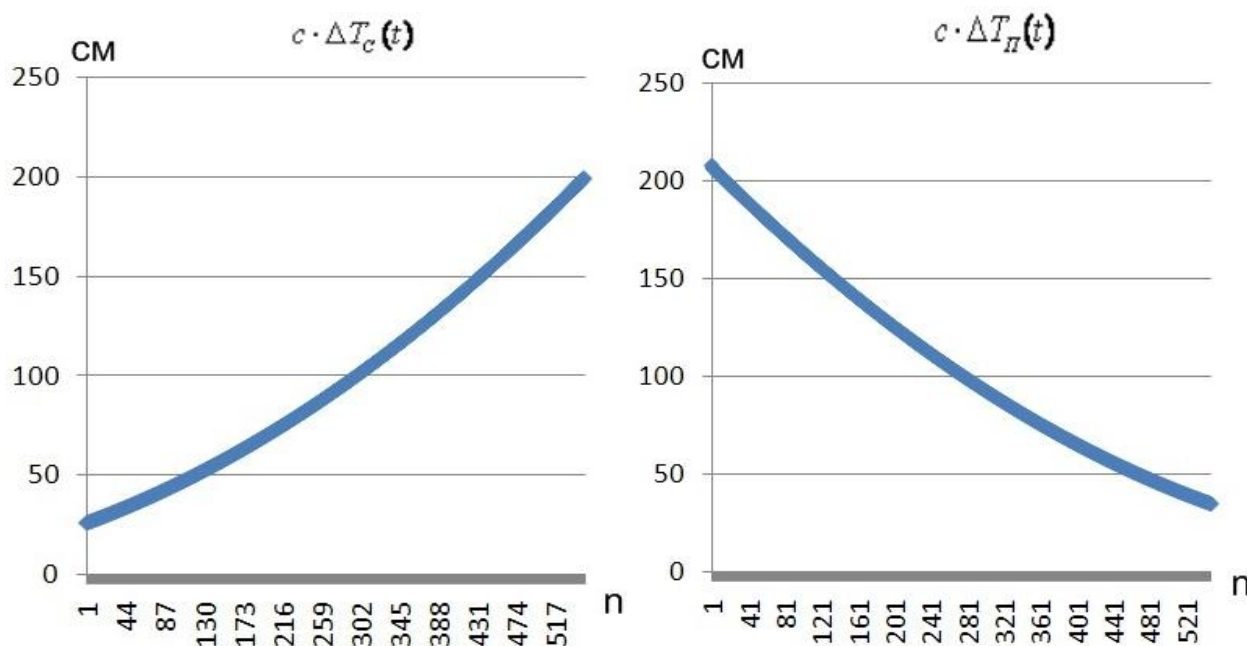


Рисунок 1 – Имитация погрешностей измерения геометрической дальности, вызванных уходами бортовых часов и часов приемной аппаратуры

Долговременная составляющая нестабильности  $s(t)$  представляется на интервале времени  $[t_0, t_k]$  линейной комбинацией

$$s(t) = \sum_{i=1}^L \varphi_i(t) \cdot a_i \quad (5)$$

полиномов Чебышева  $\varphi_i(t)$  и неизвестных постоянных на интервале времени  $[t_0, t_k]$  коэффициентов  $a_i$ .

Кратковременная составляющая нестабильности частоты  $w(t)$  трактуется как выходной сигнал формирующего фильтра, на входе которого действует порождающий центрированный случайный процесс  $\xi(t) \in N(0, \sigma_\xi^2)$  типа «белый шум» с ограниченной дисперсией.

Ионосферная задержка  $p_3(t) = \Delta D_H(t)$  (рисунок 2), выраженная в единицах длины и связанная с изменением скорости распространения навигационного сигнала на участке ионосферных слоев, представляется формулой

$$\Delta D_H(t) = \varphi_H(t) \cdot \beta_H, \quad (6)$$

в которой  $\varphi_H(t) = \frac{4,04 \cdot 10^7 \cdot c}{f^2 [1 - 0,91 \cdot \cos^2 \gamma(t)]^{1/2}}$  – рассчитываемая функция отображения;  $\beta_H = \int_l N(l) \cdot dl$  – параметр, подлежащий оцениванию;  $f$  – частота несущей навигационного сигнала (1/c);  $\gamma(t)$  – текущий угол места, под которым от

потребителя виден НС;  $l$  – длина радиотрассы (м);  $N = TEC$  – полная электронная концентрация (эл/м<sup>2</sup>).

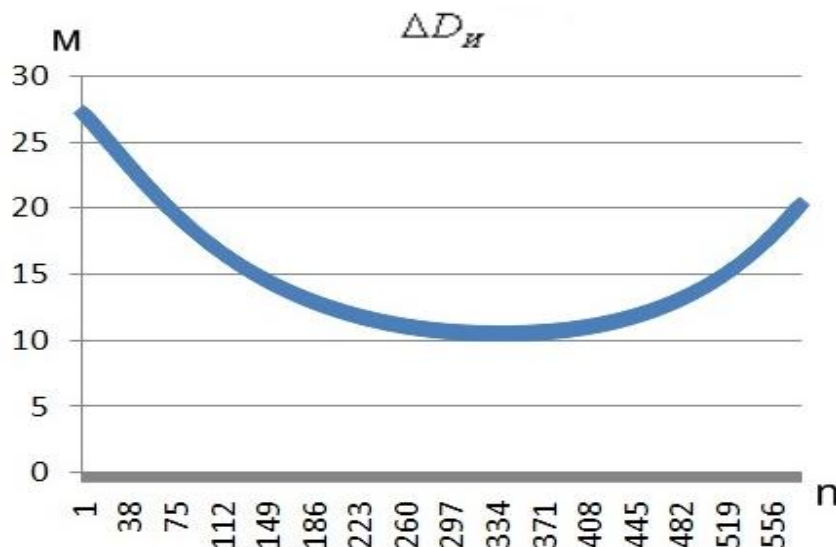


Рисунок 2 – Имитация погрешности измерения геометрической дальности, вызванная ионосферной задержкой навигационного сигнала на трассе

Для одночастотных траекторных измерений в имитаторе учтено то обстоятельство, что в кодовых и фазовых измерениях ионосферные задержки имеют противоположные знаки.

Для двухчастотных кодовых измерений в диапазонах  $L1$  и  $L2$  в силу зависимости  $\Delta D_H(t)$  от частоты, для имитации свободной от ионосферной задержки псевдодальности  $D(t)$ , используется соотношение

$$D(t) = 2,546 \cdot D_{L1}(t) - 1,546 \cdot D_{L2}(t), \quad (7)$$

в которой  $D_{L1}(t)$  и  $D_{L2}(t)$  – кодовые псевдодальности, измеренные в частотных диапазонах  $L1$  и  $L2$ . Погрешности компенсации в этом случае составляют 2 % от  $\max_i D_H(t)$ .

В уравнении измерений (3) тропосферная задержка представляется компонентой  $p_4(t) = D_{TP}(t)$  для кодовых  $C1$  и фазовых  $\Phi1$  измерений одинаковым образом.

Из множества математических моделей для расчета тропосферной задержки (модель Х. Хопфилд, Блека, Саастамойнена и др.) вида

$$D_{mp}(t) = \varphi_d(t) \cdot \beta_d + \varphi_w(t) \cdot \beta_w, \quad (8)$$

где  $\varphi_d(t)$ ,  $\varphi_w(t)$  – функции отображения для сухой и влажной компонент, зависящие от текущего угла места  $\gamma(t)$ , под которым виден НС;  $\beta_d$ ,  $\beta_w$  – тропосферные задержки сигнала в зенитном направлении для сухой и влажной компонент, выбрана для использования в программном имитаторе модель Хелен Хопфилд, для которой функции отображения для сухой и влажной компонент имеют вид соответственно:

$$\varphi_d(t) = \{\sin[\gamma^2(t) + 6,25]^{1/2}\}^{-1}, \quad \varphi_w(t) = \{\sin[\gamma^2(t) + 2,25]^{1/2}\}^{-1}, \quad (9)$$

а сухая и влажная составляющие тропосферной задержки для зенитного направления описываются выражениями

$$\beta_d = 77,64 \cdot 10^{-6} \frac{P_0}{T_0} \frac{h_d}{5}, \quad \beta_w = 0,373 \cdot 10^{-6} \frac{e_0}{T_0} \frac{h_w}{5}, \quad (10)$$

где  $P_0$  – полное давление (в миллибарах) в месте установки антенны;  $T_0$  – температура в кельвинах,  $h_d = 43$  км – предельная высота, после которой показатель преломления для сухой компоненты обращается в ноль;  $h_w = 12$  км – предельная высота для влажной компоненты;  $e_0$  – парциальное давление паров воды (в миллибарах).

При расчете компенсирующей поправки к тропосферной задержке на основе (8) с учетом (9) и (10) своего уточнения требует параметр  $e_0$ . Величина его в значительной мере зависит от состояния облачности на участках трассы навигационного сигнала.

Погрешности измерений метеопараметров  $\delta P_0 \leq 0,1$  мбар;  $\delta T_0 \leq 0,1$  К;  $\delta v \leq 1-2$  % не вносят существенных искажений в результаты расчетов  $\beta_d$ ,  $\beta_w$ . Ошибки в расчеты тропосферной поправки от использования усредненных по трассе метеопараметров, выраженные в единицах длины, не превышают 5–10 см.

В уравнении траекторных измерений проблемным представляется компенсация фактора, связанного с многолучевостью распространения навигационного сигнала. Анализ результатов приема реальных навигационных сигналов с помощью аппаратуры МРК-33 показал, что многолучевость распространения навигационного сигнала при малых углах места может быть представлена в виде выбросов и пачек выбросов в результатах измерений (рисунок 3).

Из литературных источников следует, что многолучевость распространения навигационного сигнала в кодовых и фазовых измерениях проявляется по-разному. В кодовых измерениях псевдодальности возникают знакоположительные скачки в значениях псевдодальности с уровнем до 75 м.

В фазовых измерениях при наложениях прямого и отраженного сигнала возможна наихудшая ситуация, когда эти сигналы приходят в противофазе. Это приводит к срыву снижения за фазой несущей и к потере синхронизации приемной аппаратуры по описываемому каналу. В конечном счете, возникает разрыв в данных фазовых измерений и, при восстановлении синхронизации, скачок фазовой неопределенности  $N \cdot \lambda$ . Фазовые искажения без потери синхронизации канала приводят к скачкам фазовой псевдодальности уровня 5–20 см.

Таким образом, как при кодовых, так и при фазовых измерениях проявления многолучевости следует трактовать как реализацию случайного процесса

$$p(t) = s(t_k), \quad k = 1, \dots, K,$$

моменты появления которого  $t_k$  также являются случайными величинами.

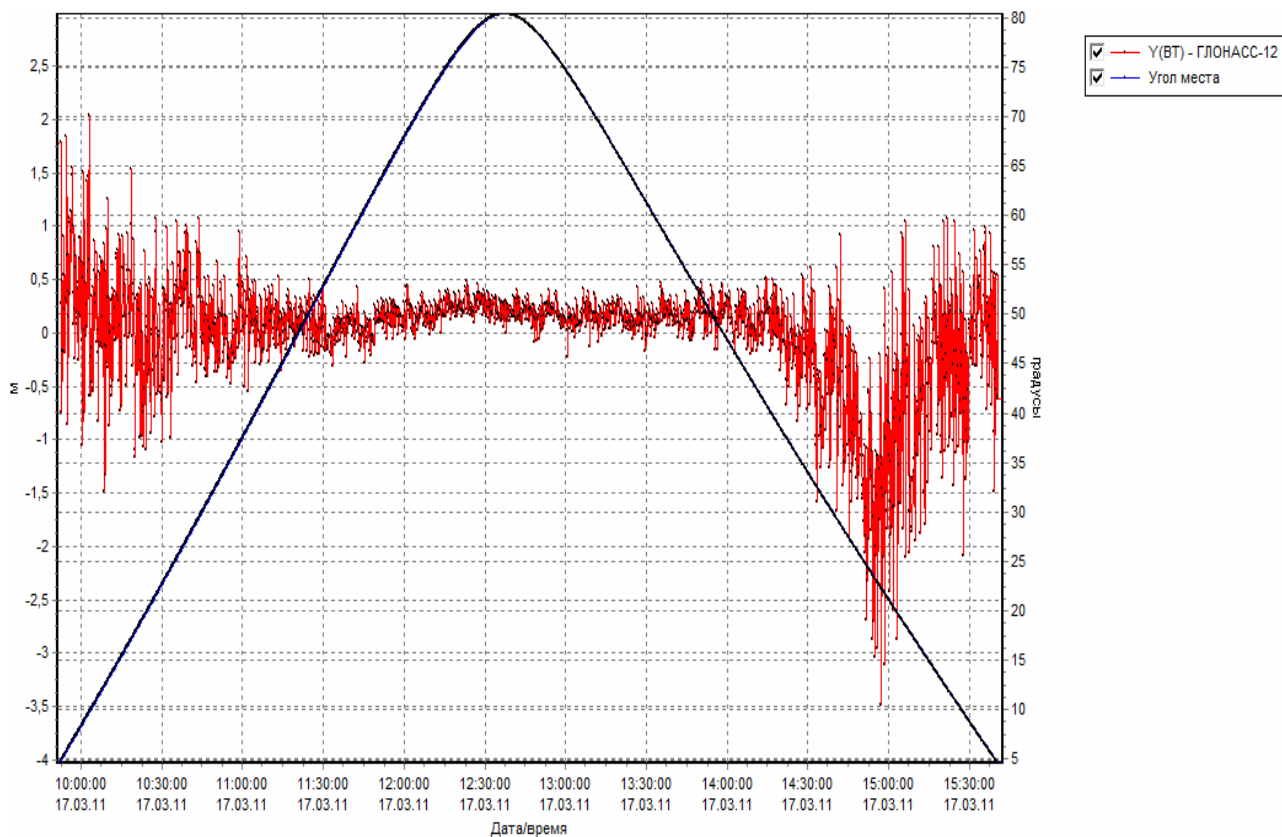


Рисунок 3 – Проявление многолучевости в виде пачки выбросов

Для исключения влияния факторов  $s(t_k)$  на результаты псевдодальномерных измерений необходима предварительная обработка реализаций  $D(t)$  с помощью специальных алгоритмов. Для отработки таких алгоритмов плодотворным является применение разработанного программного имитатора измерительной информации.

Таким образом, во второй главе получены описания основных факторов, влияющих на точность траекторных измерений. В результате получены формализмы, приемлемые для расчета поправок к действующим факторам и, в случае параметрической неопределенности, эти формализмы используются в виде математических моделей для учета влияния факторов.

Приведенные описания факторов  $p_1(t) = c \cdot \Delta T_c(t)$ ,  $p_2(t) = c \cdot \Delta T_{II}(t)$ ,  $p_3(t) = \Delta D_{II}(t)$ ,  $p_4(t) = \Delta D_{TP}(t)$ ,  $p_{11}$  были использованы в программном имитаторе измерительной информации «ModBis 24».

В третьей главе на основе сравнительного анализа методов вычислительной математики производится выбор численного метода (таблица 1) для расчета параметров движения НС ГЛОНАСС.

На основе проведенного анализа для численного интегрирования уравнений движения НС в оскулирующих элементах в имитаторе «ModBis 24» применена схема Адамса 7-го порядка. Расчет необходимых для запуска схемы Адамса начальных значений решения осуществлялся одношаговым методом Рунге – Кутты 4-го порядка.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики интегрирования уравнений движения НС различными численными методами

Сравнительные характеристики при интегрировании на интервал 30 сут (без теневых участков)	Метод Адамса 5-го порядка. Уравнения в прямоугольных параметрах (схема PE-CE)	Метод Булирша – Штера. Уравнения в прямоугольных параметрах	Метод Эверхарта. Уравнения в прямоугольных параметрах	Метод Адамса 7-го порядка. Уравнения в прямоугольных параметрах (схема PE-CE)	Метод Адамса 7-го порядка. Уравнения в неособенных элементах (схема PECE)
Погрешность интегрирования (сравнение с центр. полем), мм	237	100	0,07	50	0,1
Погрешность интегрирования (сравнение в полном поле), мм	250	160	3	60	4
Относительное время интегрирования	5,2	5	5,8	4	1,9

Сложности применения этих многошаговых численных методов связаны с изменением гладкости правой части интегрируемых уравнений (1) в моменты вхождения НС в теневой участок орбиты. На границах «свет – тень» возмущающие ускорения от радиационного давления на НС солнечного излучения терпят разрывы. При изменении гладкости правой части интегрируемого уравнения возникает необходимость в сгущении сетки, на которой определено решение. Для многошаговых методов Адамса такое сгущение существенно усложняет алгоритм интегрирования.

В работе автором исследовалась возможность применения для интегрирования уравнений движения НС в оскулирующих элементах современных численных схем Кранка – Николсона с экстраполяцией по Ричардсону.

Проведенные исследования показали, что процедура экстраполяции Ричардсона, основанная на применении схемы Кранка – Николсона, обеспечивает те же характеристики точности, что и метод Адамса, что делает ее перспективным методом решения задачи прогнозирования орбит НС в рамках проблематики, возникающей при разработке спутниковых навигационных технологий.

Вместе с тем, при решении сложных задач реализация этого метода связана с серьезными алгоритмическими трудностями и необходимостью хранить в оперативной памяти весь расчетный материал, что может привести к повышенным требованиям к компьютерным ресурсам.

В четвертой главе приведено основное содержание методик беззапросных траекторных измерений на основе применения программного имитатора изме-

рительной информации, разработанных при непосредственном участии автора, и представлены результаты исследования метрологических характеристик программного имитатора «ModBis 24».

Методика беззапросных траекторных измерений, разработанная в соответствии с ГОСТ Р 8.563–2009 «Методики (методы) измерений», позволяет:

- 1) произвести оценку точности траекторных измерений;
- 2) определить вес каждого фактора в общей погрешности измерений;
- 3) произвести планирование сеансов измерений;
- 4) воспроизвести характер изменения каждого влияющего фактора на видимом отрезке орбиты.

Идейная сторона разработанной методики заключается в следующем:

- с помощью программного имитатора измерительной информации «ModBis 24» для заданных параметров математических моделей влияющих факторов, рассчитываются поправки на уходы бортовых часов и часов приемной аппаратуры, на учет задержки навигационного сигнала в тропосферном и ионосферном слоях (в дальнейшем результаты измерений компенсируются с помощью этих поправок);

- шумы измерений и проявление многолучевости распространения навигационных сигналов компенсируются за счет применения алгоритмов предварительной обработки измерительной информации.

Программный имитатор измерительной информации, поступающей с сети БИС «ModBis 24», применялся автором как средство для расчета поправок и компенсации тропосферных погрешностей при обработке результатов внешних сличений эталона ВЭТ 1-19 ФГУП «СНИИМ» с другими эталонами времени и частоты.

Методика компенсации тропосферных погрешностей заключается в следующем.

1. На интервале времени длительностью в одни сутки определяется состав орбитальной группировки навигационных спутников, участвующих во внешних сличениях эталонов, и накапливаются в базе данных результаты проведенных траекторных измерений.

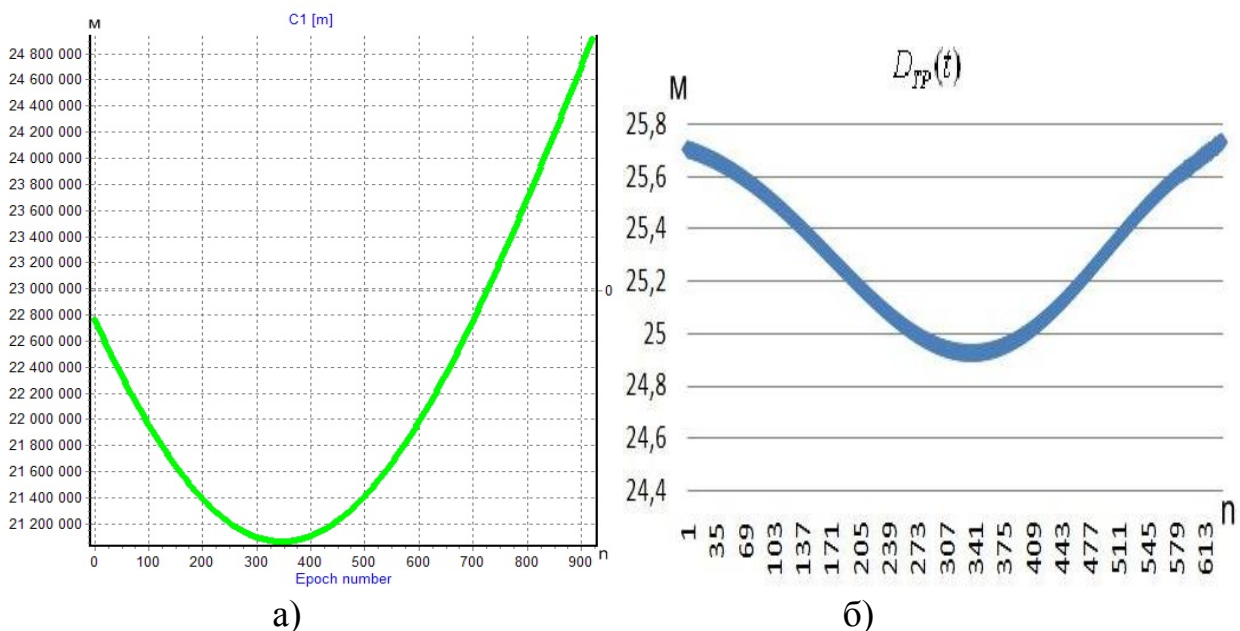
2. Для выбранных навигационных спутников из RINEX протоколов (содержащих бортовую эфемеридную информацию) фиксируются начальные условия для расчета с помощью программного имитатора «ModBis 24» соответствующих выбранной орбитальной группировке опорных траекторий.

В качестве иллюстрации, на рисунке 4, приведены результаты измерения псевдодальности от пункта Нм на 15 сентября 2011 года и соответствующая прохождению этого спутника рассчитанная задержка навигационного сигнала в тропосферном слое.

3. В соответствии с этими опорными траекториями с помощью программного имитатора рассчитываются на всем прохождении навигационных спутников тропосферные поправки.

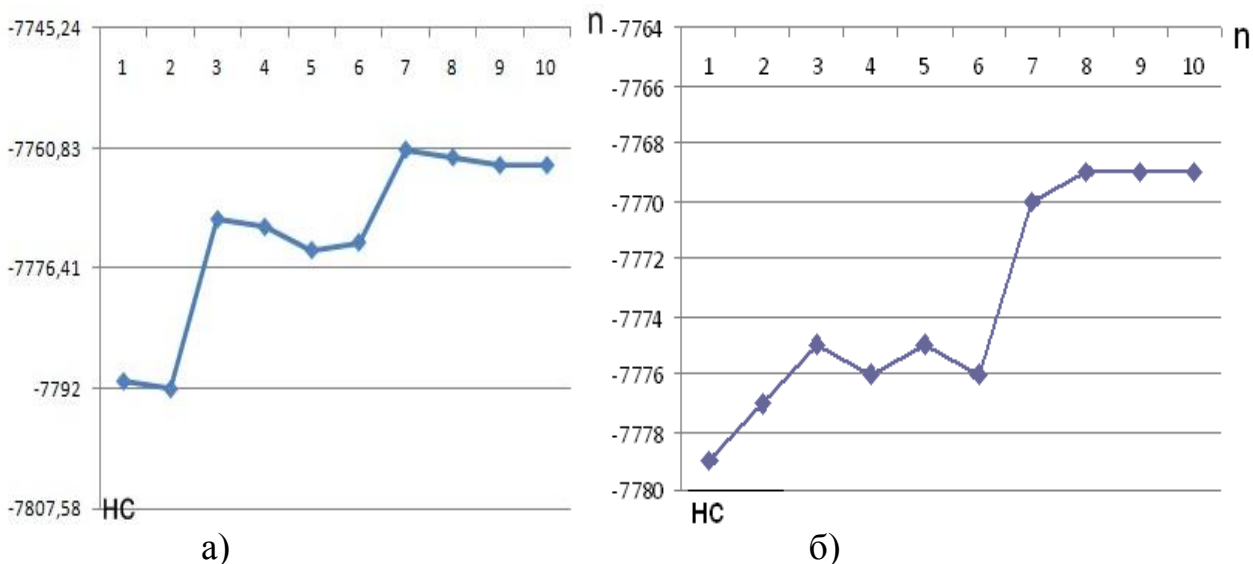
4. С помощью рассчитанных таким образом поправок корректируются результаты беззапросных траекторных измерений, содержащихся в базе данных суточных измерений.

5. После проведенной коррекции данные траекторных измерений используются для формирования протокола CGGTTS, в котором формируется оценка момента шкалы времени эталона ВЭТ 1-19, рассчитанная относительно системной шкалы времени ГЛОНАСС.



а) б)  
Рисунок 4 – Измеряемая псевдодальность от спутника № 108 15 сентября 2011 г. (а) и соответствующая этим измерениям задержка навигационного сигнала в тропосферном слое (б)

На рисунке 5 показаны результаты коррекции момента шкалы времени эталона ВЭТ 1-19.



а) б)  
Рисунок 5 – Погрешность воспроизведения шкалы времени до корректировки (а) и после корректировки (б) за счет учета тропосферной задержки на каждой радиотрассе

В программном имитаторе «ModBis 24» также предусмотрена возможность расчета опорных траекторий, достаточно близких к действительной траектории движения НС.

В качестве такой опорной траектории можно использовать гладкую функцию  $\rho_\delta(t)$ , построенную по бортовым эфемеридам НС  $[\mathbf{u}_\ominus(t_b), \dot{\mathbf{u}}_\ominus(t_b), \ddot{\mathbf{u}}_\ominus(t_b), t_b]$ , транслируемым в составе навигационного сообщения с периодичностью  $t_{b+1} - t_b = 30$  минут. Гладкое восполнение функции  $\rho_\delta(t)$  между узлами  $\rho[\mathbf{u}_\ominus(t_b), \mathbf{u}_\oplus]$  обеспечивается применением интерполяционных полиномов Чебышева 3-го порядка.

Это позволяет рассмотреть дефекты измерений, скачки данных и пачки выбросов, имеющих небольшой уровень (порядка 100 м) по сравнению с измеряемыми дальностями  $\rho(\mathbf{u}_C, \mathbf{u}_\oplus) \in [19\ 000 - 25\ 000 \text{ км}]$  в относительном движении НС вдоль некоторой опорной траектории

$$\Delta D(t) = D(t) - \rho_\delta(t) = \Delta\rho(t) + s(t_a) + v(t). \quad (11)$$

В  $\Delta D(t)$  содержатся выбросы  $s(t_a)$ , разрывы в данных на подынтервалах времени, где  $D(t)$  принимает нулевые значения, проявляющиеся как пачки выбросов, а также скачки фазовой неоднозначности в фазовых измерениях.

С помощью программного имитатора измерительной информации «ModBis 24» моделировались проявления многолучевости распространения навигационного сигнала в виде пачек выбросов (см. рисунок 3) и обрабатывались алгоритмы предварительной обработки результатов траекторных измерений, содержащих проявления многолучевости.

Появление выбросов или пачек выбросов случайной амплитуды  $s_a$  в случайные моменты времени  $t_k$  имитируется для кодовых измерений функцией  $p_{11}(t) = s(t_a)$

$$s(t_a) = \begin{cases} s_a, & t = t_a, a = 1, 2, \dots \\ 0, & t \neq t_a, \end{cases} \quad (12)$$

а для фазовых измерений процесс  $s(t_a)$

$$s(t_a) = \begin{cases} M_a, & t \geq t_a, a = 1, 2, \dots \\ 0, & t \neq t_a \end{cases} \quad (13)$$

описывает появление в случайные моменты времени  $t_a$  скачков фазовой неоднозначности.

Результаты предварительной обработки кодовых  $C_1, P_1, P_2$  и фазовых  $\Phi_1, \Phi_2$  измерений с целью получения оценки геометрической дальности

$$\hat{\rho}(\mathbf{u}_C, \mathbf{u}_\oplus) = \rho_\delta(t) + \Delta\hat{\rho}(t), \quad (14)$$

достаточно близкой к действительной текущей геометрической дальности  $\rho(\mathbf{u}_C, \mathbf{u}_\oplus)$  и не содержащей выбросов  $s(t_a)$ , скачков фазы и разрывов в дан-

ных, приведены на рисунке 6. Для дальнейшей обработки полученная оценка  $\hat{\rho}(\mathbf{u}_C, \mathbf{u}_D)$  будет использоваться в качестве результата траекторных измерений. После такой предварительной обработки сглаженные результаты могут быть использованы для координатно-временных определений или формирования эфемеридно-временной информации ГЛОНАСС.

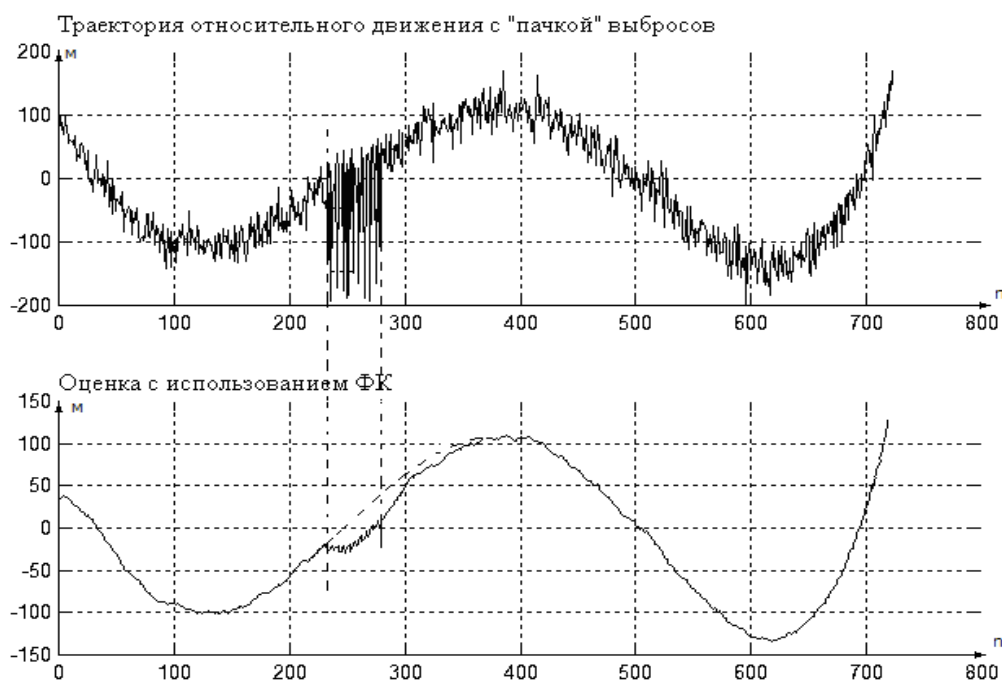


Рисунок 6 – Траектория относительного движения НС с пачкой выбросов и результаты обработки этой траектории

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В диссертационной работе решена важная задача обеспечения единства измерений в космическом комплексе ГЛОНАСС – создана методическая основа для исследования точности беззапросных траекторных измерений и разработан программный имитатор измерительной информации для этих исследований.

2. Проведен обоснованный выбор математических моделей факторов, влияющих на точность траекторных измерений (уходы бортовых часов и часов приемной аппаратуры, задержки навигационных сигналов в ионосферном и тропосферном слоях), и разработаны программные приложения для имитации этих факторов. Выбраны численные методы интегрирования уравнений движения навигационных спутников.

3. Разработанный программный имитатор измерительной информации, поступающей с сети беззапросных измерительных станций по навигационным спутникам ГЛОНАСС и GPS, представлен в виде пакета программ, обеспечивающих: расчет движения орбитальной группировки навигационных спутников с учетом действующих на спутник возмущений; задание сети беззапросных измерительных станций в определенной системе координат; расчеты геометрических дальностей от спутников до измерительных станций; имитацию факторов,

влияющих на точность траекторных измерений, и оценку составляющих погрешностей траекторных измерений, связанных с действием указанных факторов.

4. Разработана методика беззапросных траекторных измерений на основе применения программного имитатора измерительной информации, поступающей с сети беззапросных измерительных станций по навигационным спутникам ГЛОНАСС и GPS.

5. Разработана и применена в Государственной службе времени и частоты ФГУП «СНИИМ» для предварительной подготовки измерительной информации в системе Государственного эталона ВЭТ 1-19 методика компенсации тропосферных погрешностей беззапросных траекторных измерений на основе созданного программного имитатора.

6. Разработаны предложения по применению функций программного имитатора в качестве дополнений к функциям физических имитаторов навигационных сигналов.

### ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Бояркеева, О.В. Исследования точности траекторных измерений методами имитационного моделирования / О.В. Бояркеева // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 3. – С. 64–69.

2 Нетесаная, О.В. Влияние нестабильностей часов на точность координатно-временных определений / О. В. Нетесаная // Сборник материалов научно-исследовательской работы студентов Сибирской государственной геодезической академии. – Новосибирск: СГГА, 2007. – С. 11.

3 Нетесаная, О.В. Проблемы метрологического обеспечения беззапросных траекторных измерений по КА ГЛОНАСС / О.В. Нетесаная, А.С. Толстиков // Сборник материалов IV Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2008». Т. 4: Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика и микротехника. Ч. 1. – Новосибирск: СГГА, 2008. – С. 20–24.

4 Нетесаная, О.В. Исследование метрологических характеристик программного имитатора «MODBIS24» / О.В. Нетесаная // Сборник научных трудов аспирантов и молодых ученых Сибирской государственной геодезической академии. – Новосибирск: СГГА, 2008. – Вып. 5. – С. 34–37.

5 Бояркеева, О.В. Программный имитатор измерительной информации, поступающей с КА ГЛОНАСС и КА GPS / О.В. Бояркеева, А.С. Толстиков // Сборник материалов V Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2009». Т. 5: Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика и микротехника. Ч. 2. – Новосибирск: СГГА, 2009. – С. 205–210.

6 Бояркеева, О.В. Программный имитатор беззапросных траекторных измерений в системе метрологического обеспечения ГЛОНАСС / О.В. Бояркеева, А.С. Толстиков // Сборник материалов VI Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2010». Т. 5: Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии. Ч. 2. – Новосибирск: СГГА, 2010. – С. 175–179.

7 Бояркеева, О.В. Программный имитатор измерительной информации, поступающей с орбитальной группировки навигационных спутников ГЛОНАСС / О.В. Бояркеева // Сборник кратких сообщений I Межотраслевой конференции по проблемам новых технологий. – Миасс: МСНТ, 2010. – С. 63–66.

8 Бояркеева, О.В. Программный имитатор измерительной информации, поступающей от навигационных спутников орбитальной группировки ГЛОНАСС / О.В. Бояркеева, А.С. Толстиков // Материалы X международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», АПЭП-2010. Т. 3: Метрология и метрологическое обеспечение. Измерительные приборы, устройства и системы. – Новосибирск: НГТУ, 2010. – С. 41–46.

9 Бояркеева, О.В. Компенсация тропосферных погрешностей в навигационных ГЛОНАСС/GPS технологиях / О.В. Бояркеева, А.С. Толстиков // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. трудов / под ред. А.И. Громыко, Г.С. Патрина. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т. – 2010. – С. 165–169.

10 Бояркеева, О.В. Методы и средства имитации навигационных полей / О.В. Бояркеева // Сборник материалов VII Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2011». Т. 5: Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии. Ч. 2. – Новосибирск: СГГА, 2011. – С. 169–172.

В работах, выполненных в соавторстве, личный вклад автора Бояркеевой О.В. в равных долях с соавторами.