

На правах рукописи



БАБУРИН АНТОН АЛЕКСАНДРОВИЧ

**МЕТОДИКА ВЫСОКОТОЧНОГО АБСОЛЮТНОГО
МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЯ
С РАЗРЕШЕНИЕМ ЦЕЛОЧИСЛЕННОЙ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ
ПСЕВДОФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СИГНАЛОВ ГЛОНАСС**

Специальность: 2.2.16. – «Радиолокация и радионавигация»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в акционерном обществе «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем» (АО «Российские космические системы»)

Научный руководитель: **Поваляев Александр Александрович**,
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
отделения по функциональным дополнениям и ассистирующим си-
стемам ГНСС, АО «Российские космические системы»

Официальные оппоненты: **Карутин Сергей Николаевич**,
доктор технических наук, доцент, генеральный конструктор си-
стемы «ГЛОНАСС» – заместитель генерального директора,
АО «ЦНИИмаш»

Майстренко Евгений Владимирович,
кандидат технических наук, начальник отдела по Научно-исследо-
вательской работе Научно-образовательного центра, АО «Концерн
радиостроения «Вега»

Ведущая организация: Акционерное общество «Конструкторское бюро навигационных систем» (АО «КБ НАВИС»), 127411, г. Москва, Дмитровское шоссе, д. 157, стр. 5, 8

Защита состоится «17» сентября 2024 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте МАИ по ссылке https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=179375.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, Учёный совет МАИ.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.327.01,
кандидат технических наук



А.А. Горбунова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Возрастающие требования к точности и оперативности местоопределений навигационной аппаратуры потребителя (НАП) не могут быть удовлетворены базовыми средствами глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Для повышения точности, надёжности, целостности, непрерывности местоопределения широко используются системы функциональных дополнений ГНСС – спутниковые системы дифференциальной коррекции (Satellite Based Augmentation System – SBAS), например, российская Система дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) или американская Wide Area Augmentation System (WAAS) и другие. Они обеспечивают точность местоопределений менее 1 метра и действуют в региональном или континентальном масштабе. Тем не менее существует немалое число морских, речных, наземных, космических потребителей, которые выдвигают ещё более высокие требования к навигационному обеспечению. Например, согласно Радионавигационному плану Российской Федерации, такие задачи, как:

- плавание в акваториях портов и выполнение специальных работ;
- управление движением железнодорожного транспорта, строительными и сельскохозяйственными машинами;
- картография и геодезия, землеустройство, путевое хозяйство железных дорог;
- навигация космических аппаратов (КА) геодезического обеспечения и дистанционного зондирования Земли требуют от дециметровой до миллиметровой точности местоопределения как в локальном, так и в глобальном масштабе.

Для достижения таких точностей с помощью ГНСС необходимо компенсировать систематические смещения в измерениях, использовать высокоточную эфемеридно-временную информацию (ЭВИ) и так называемые псевдофазовые измерения, которые обладают достаточной (сантиметровой-миллиметровой) точностью. Однако псевдофазовые измерения имеют недостаток – они целочисленно неоднозначны, что приводит к трудностям при их обработке.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами высокоточной навигации, в том числе обработкой псевдофазовых измерений занимались такие отечественные учёные, как А.А. Поваляев, В.В. Пасынков, К.М. Антонович, А.Н. Подкорытов, В.В. Митрикас, В.Ф. Брагинец, И.О. Скакун, Д.С. Печерица, Л.А. Липатников, А.А. Карауш, А.С. Пустошилов и другие, а также зарубежные учёные: P.J.G. Teunissen, S. Vanville, P. Collins, D. Laurichesse, F. Mercier, S. Bisnath, J. Couba, M. Ge, J. Geng, L. Wanninger, A. Khodabandeh и другие.

Использование псевдофазовых измерений возможно в режиме относительных и абсолютных местоопределений. В алгоритмическом отношении режим относительных

местоопределений (известный как Real Time Kinematic, RTK – кинематика в реальном времени) можно считать более простым, однако он требует наличия как минимум одного дополнительного навигационного приёмника (называемого обычно базовым) и имеет ограниченную рабочую зону.

Абсолютные методы навигации, использующие псевдофазовые измерения, в англоязычной литературе известны под общим названием Precise Point Positioning (PPP). В отечественной литературе используется термин «высокоточное абсолютное местоопределение» (ВАМО). Как правило, под аббревиатурой PPP обычно понимается режим float PPP (действительное ВАМО), при котором целочисленные свойства псевдофазовых измерений не учитываются. ЭВИ для режима действительного ВАМО состоит из информации о координатах спутников (эфемеридная информация) и информации о смещениях показаний спутниковых часов (временная информация). Такую ЭВИ вычисляют и предоставляют различные аналитические центры, например, Европейский центр определения орбит (Center for Orbit Determination in Europe, CODE), Министерство природных ресурсов Канады (Natural Resources Canada, NRCan) и другие, а также российские: Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) АО «ЦНИИмаш» и АО «НПК «СПП» в рамках Системы высокоточного определения навигационной и эфемеридно-временной информации (СВО ЭВИ). Методы действительного ВАМО могут обеспечить сантиметровую точность местоопределения в абсолютном режиме, однако достижение такой точности требует достаточно долгого времени непрерывных измерений – даже при совместном использовании нескольких ГНСС время сходимости решения к требуемому уровню точности (время инициализации) в статическом режиме составляет не менее десяти, а обычно – несколько десятков минут и более.

Повышение оперативности высокоточного местоопределения (снижение времени сходимости или времени инициализации) возможно за счёт использования целочисленных свойств псевдофазовых измерений (режим целочисленного ВАМО, integer PPP, PPP-AR – ambiguity resolution, разрешение неоднозначности). Для целочисленной оценки псевдофазовых неоднозначностей необходима информация об аппаратурных задержках приёмника и спутников. Информация о спутниковых аппаратурных задержках отсутствует в оценках смещений показаний спутниковых часов ЭВИ, используемой в действительном ВАМО. В связи с этим для целочисленного ВАМО требуется вычисление специальных поправок к спутниковым часам (временной информации), хотя для вычисления координат спутников можно использовать эфемеридную информацию для действительного ВАМО. Если для американской системы GPS и других ГНСС, где используется кодовое разделение спутниковых сигналов (или кодовое разделение каналов, КРК, англ. Code Division Multiple Access, CDMA), таких как GALILEO (Европейский союз) и BEIDOU (Китай), алгоритмы целочисленного ВАМО хорошо развиты, то для российской системы ГЛОНАСС, где на большинстве спутников в настоящее время используются только сигналы с

частотным разделением каналов (ЧРК, англ. Frequency Division Multiple Access, FDMA), эти алгоритмы развиты намного хуже. Кроме того, на перспективных КА «ГЛОНАСС-К2», излучающих сигналы с КРК, не планируется отказываться от сигналов с ЧРК.

Таким образом, развитие методики и алгоритмов повышения оперативности ВАМО по сигналам ГЛОНАСС с частотным разделением является актуальной задачей.

Объект исследования – технология местоопределения с помощью ГНСС.

Предмет исследования – методики высокоточных абсолютных местоопределений навигационного приёмника с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений и алгоритмы вычисления необходимой высокоточной корректирующей информации (смещений показаний спутниковых часов) по измерениям сигналов ГЛОНАСС с частотным разделением.

Цель диссертационной работы – повышение оперативности ВАМО путём снижения времени сходимости навигационного решения (времени достижения сантиметрового уровня точности решения) по измерениям сигналов ГЛОНАСС за счёт разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений, а также за счёт совместного использования нескольких ГНСС в режиме целочисленного ВАМО.

Частные задачи диссертационной работы:

1) Разработка математических моделей измерений навигационного приёмника по сигналам ГЛОНАСС с частотным разделением, позволяющих целочисленно оценивать псевдофазовые неоднозначности.

2) Разработка методики оценки различия кодовых аппаратурных задержек в НАП, для выделения НАП, обладающей схожими характеристиками (однотипной НАП). Уточнение (упрощение) математических моделей измерений однотипной НАП.

3) Разработка алгоритмов оценивания смещений показаний часов спутников ГЛОНАСС по измерениям сети наземных станций, оборудованных однотипной НАП.

4) Разработка методики целочисленного ВАМО НАП с использованием вычисленных смещений показаний спутниковых часов при отдельном и совместном использовании ГНСС с частотным и кодовым разделением сигналов в диапазонах L1, L2.

Методология и методы исследования

В работе использовались методы математического анализа, линейной алгебры, теории вероятностей и понятия теории линейных векторных пространств. Для программной реализации алгоритмов и обработки реальных измерений навигационных приёмников использовался язык программирования C/C++ и программный пакет с открытым исходным кодом RTKLib, а также пакет прикладных программ MATLAB.

Научная новизна результатов исследования:

1) Разработанная методика высокоточного абсолютного местоопределения потребителя с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений применима к измерениям сигналов ГЛОНАСС с частотным разделением, в отличие от известных методик для ГНСС с кодовым разделением.

2) Разработано приложение теории S-преобразования (линейной алгебры и теории векторных пространств), позволяющее получать нестрогие целочисленные оценки целочисленных переменных недоопределённой системы линейных алгебраических уравнений для измерений псевдофаз сигналов ГЛОНАСС с частотным разделением.

3) Сформулированы условия, при которых возможно осуществлять нестрогое целочисленное оценивание целочисленных переменных недоопределённой системы линейных уравнений для измерений ГЛОНАСС, при котором отличие от целых чисел пренебрежимо мало, что позволяет использовать известные алгоритмы разрешения целочисленной неоднозначности для уменьшения времени сходимости решения.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке общего подхода с учётом характерных особенностей решения задачи (пользовательской и сетевой) высокоточных абсолютных местоопределений с разрешением целочисленной псевдофазовой неоднозначности по измерениям сигналов любой ГНСС как с кодовым, так и с частотным разделением.

Практическая значимость результатов исследования:

1) Разработанный способ «нестрогой целочисленной» оценки псевдофазовых неоднозначностей позволил потребителям сигналов ГЛОНАСС с частотным разделением при обработке измерений применять известные алгоритмы целочисленного разрешения неоднозначности, что обеспечивает снижение времени инициализации ВАМО по ГЛОНАСС с сантиметровым уровнем точности.

2) Разработан и реализован в виде специального программно-математического обеспечения алгоритм вычисления необходимых потребителю спутниковых поправок (смещений показаний спутниковых часов) по измерениям сети наземных станций, позволяющий осуществить ВАМО по измерениям сигналов ГЛОНАСС с частотным разделением (с использованием алгоритмов целочисленного разрешения неоднозначностей псевдофазовых измерений).

3) На примере обработки реальных измерений экспериментально продемонстрировано уменьшение времени сходимости решения и увеличение надёжности разрешения целочисленной неоднозначности при совместном использовании сигналов ГЛОНАСС с частотным разделением и GPS с кодовым разделением в режиме целочисленного ВАМО потребителя.

4) Разработанный алгоритм для целочисленного ВАМО однотипной НАП по сигналам ГЛОНАСС с частотным разделением схож с алгоритмом для ГНСС с кодовым разделением, что значительно упрощает модернизацию существующего программного обеспечения.

Достоверность результатов исследования подтверждается корректным использованием математического аппарата и экспериментами, проведенными с использованием реальных измерений навигационных приёмников, а также соответствием результатов, полученных автором, результатам, известным из литературы.

Апробация результатов исследования

Результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических семинарах, заседаниях научно-технического совета АО «Российские космические системы» и на следующих международных научно-технических конференциях:

- X Международный симпозиум «Метрология времени и пространства», Менделеево, Московская область, Россия 6-8 октября 2021, ФГУП «ВНИИФТРИ»;

- XI Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий», Москва, 6-8 июня 2023, АО «Российские космические системы».

Внедрение результатов исследования

Результаты работы использовались в АО «Российские космические системы» и в АО «НПК «СПП», а также в учебном процессе Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), что подтверждается соответствующими актами.

Положения, выносимые на защиту:

1) Математические модели измерений ГЛОНАСС с линейной аппроксимацией фазо-частотной характеристики (ФЧХ) НАП позволяют целочисленно оценивать псевдофазовые неоднозначности и не требуют дополнительной калибровки НАП.

2) Методика сравнения кодовых аппаратурных задержек различной НАП позволяет выявлять однотипную НАП, обладающую схожими характеристиками.

3) Предложенный способ «нестрого целочисленной» оценки псевдофазовых неоднозначностей ГЛОНАСС позволяет применять известные алгоритмы целочисленного разрешения неоднозначностей в задаче высокоточных абсолютных местоопределений по измерениям сигналов ГЛОНАСС для сокращения времени сходимости решения.

4) Разработанная методика решения пользовательской и сетевой задач целочисленного ВАМО позволяет сократить время сходимости решения до точности 3-5 см по сигналам ГЛОНАСС с частотным разделением до 5-25 минут, а при совместном использовании ГЛОНАСС и GPS – до мгновенного решения.

Личный вклад автора

Экспериментальная и теоретическая часть работы, относящаяся к использованию системы ГЛОНАСС и совместному использованию ГЛОНАСС и GPS, выполнена автором лично. Часть работы, относящаяся к использованию системы GPS, выполнена совместно с научным руководителем д.т.н., проф. Поваляевым А.А. и к.т.н., доц. Подкорытовым А.Н.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 110 наименований, и шести приложений. Работа изложена на 161 странице машинописного текста, содержит 36 рисунков и 6 таблиц.

Благодарности

Автор выражает благодарность и глубокую признательность научному руководителю, д.т.н., проф. Поваляеву А.А., а также своим коллегам, сотрудникам АО «Российские космические системы», особенно к.т.н., доц. Подкорытову А.Н. за воодушевление, непрестанную помощь и поддержку, оказанную в процессе написания работы на всех её этапах, а также за критику и содержательные беседы, способствовавшие улучшению работы.

За ценные замечания и критику автор благодарит д.т.н. Жодзишского А.И., д.т.н. Куршина В.В., к.т.н. Кислякова М.Ю., к.т.н., доц. Мезенцева А.В., к.т.н. Миткина Е.В., к.т.н. Нестерова О.В., к.т.н., с.н.с. Федотова С.А.

Работа оформлена с использованием комплекса программ для создания научно-технических документов в редакторе Microsoft Word 2007 и выше «Шаблон Бирюкова Ворд (ШБВ)» (разработчик – Бирюков А.А.), за что автор выражает отдельную признательность.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены объект и предмет исследования, цели и задачи работы, описана методология, отмечена научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** сделан краткий обзор известных из литературы подходов к реализации режима целочисленного ВАМО, описаны особенности и преимущества, которые даёт использование алгоритмов целочисленного разрешения неоднозначности при решении навигационной задачи, рассмотрены математические модели измерений псевдофазы и псевдодалности ГЛОНАСС и ГНСС с кодовым разделением (на примере GPS) на исходных частотах и линейные комбинации измерений.

Для достижения сантиметровой точности местоопределения по измерениям сигналов ГНСС необходимо компенсировать все возможные систематические смещения в измерениях и

использовать высокоточную ЭВИ и псевдофазовые измерения. Основной алгебраической проблемой обработки псевдофазовых измерений, является то, что системы линейных (линеаризованных) уравнений, возникающие при их обработке, – недоопределены (имеют недостаток ранга и, следовательно, имеют бесконечное множество решений) в силу целочисленной неоднозначности этих измерений. Кроме того, при обработке необходимо учитывать наличие в кодовых и псевдофазовых измерениях различных задержек в аппаратуре как приёмника, так и спутника. Обработка измерений сигналов ГЛОНАСС с частотным разделением дополнительно осложнена присутствием в них так называемых межлитерных задержек и различием длин волн несущих колебаний различных спутников.

В режиме действительного ВАМО (float PPP) возможна оценка кодовых и фазовых аппаратурных задержек в сумме с целочисленными неоднозначностями, при котором они теряют своё целочисленное свойство. Число оцениваемых переменных при этом уменьшается, что позволяет получить единственное векторное решение системы уравнений. Основным недостатком такого подхода является долгое время сходимости решения к сантиметровому уровню точности. Снижение времени сходимости возможно за счёт использования при обработке информации о целочисленной природе псевдофазовых неоднозначностей и применении алгоритмов их разрешения. Для реализации режима целочисленного ВАМО необходима информация о кодовых и фазовых аппаратурных задержках спутников и приёмника. Поправки к показаниям спутниковых часов, используемые в режиме действительного ВАМО, не содержат информации о задержках в аппаратуре КА и поэтому в режиме целочисленного ВАМО использовать эти поправки невозможно.

Задача целочисленного ВАМО распадается на две: «сетевую задачу» – задачу определения необходимой временной информации (или временных корректирующих поправок – ВКП) и «пользовательскую задачу» – задачу определения высокоточных координат потребителя с использованием вычисленных в сетевой задаче ВКП (высокоточные координаты спутников как в сетевой, так и в пользовательской задаче полагаются известными, например, из ЭВИ для действительного ВАМО).

Из литературы известно несколько математических моделей измерений псевдодальностей и псевдофаз, используемых в качестве основы в разных подходах к реализации режима целочисленного ВАМО. Эти подходы представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Классификация подходов к реализации режима целочисленного ВАМО

Название модели	Авторы	Аналитический центр, вычисляющий соответствующую ЭВИ
Fractional Cycle Bias (FCB), Uncalibrated Hardware Delay (UHD), Uncalibrated Hardware Bias (UHB), Uncalibrated Phase Delay (UPD), «дробная часть задержки»	Ge M., Gendt G. и др.	Department of Geodesy and Remote Sensing, GeoForschungsZentrum (GFZ), School of Geodesy and Geomatics at Wuhan University (SGG-WHU)
Integer Recovery Clock (IRC), «часы, восстанавливающие целочисленность»	Laurichesse D., Mercier F.	Centre national d'études spatiales (CNES)
Decoupled Clock (DC), «разделённые часы»	Collins P.	Natural Resources Canada (NRCan)

Каждый подход имеет свои преимущества и недостатки, однако существует ряд исследований, показывающих, что все эти подходы эквивалентны друг другу и временные поправки (высокоточная ЭВИ), вычисленные в рамках этих подходов, содержат одну и ту же информацию. Из литературы известно решение задачи целочисленного ВАМО по измерениям сигналов ГЛОНАСС только в рамках модели FCB. Однако в настоящей работе используется модель DC, так как она по мнению автора является более строгой и обоснованной с математической точки зрения, а также по причине того, что она лучше освещена в отечественной литературе.

Для целочисленного разрешения псевдофазовых неоднозначностей в работе используется метод целочисленного унимодулярного преобразования (метод ЦУМП), который в англоязычной литературе получил название LABMDA-метод (least-squares ambiguity decorrelation adjustment). Снижение времени сходимости при использовании алгоритмов целочисленного разрешения достигается за счёт того, что при целочисленной оценке параметров псевдофазовых неоднозначностей при их правильном разрешении истинное значение этих параметров становится известно раньше, чем будет достигнута сходимость действительного решения. Обратной стороной использования алгоритмов целочисленного разрешения является появление понятия «аномальной ошибки» (ошибки неправильного разрешения неоднозначности) при которой в целочисленном решении появляется значительная систематическая ошибка. В связи с этим необходимо стремиться к минимизации вероятности аномальной ошибки.

В работе используются следующие математические модели измерений псевдодалностей P_1^j , P_2^j , m и псевдофаз L_1^j , L_2^j , m для j -го спутника ГЛОНАСС в диапазоне частот L1, L2 с лиnearизованной относительно частоты (относительно номера литеры спутника ГЛОНАСС) фазовой задержкой в аппаратуре приёмника:

$$\begin{aligned}
P_1^j &= R^j + T_{trop}^j + T_{ion,1}^j + T + B_1^j - t^j - b_1^j + \varepsilon_{p1}^j, \\
P_2^j &= R^j + T_{trop}^j + \frac{n_1^2}{n_2} T_{ion,1}^j + T + B_2^j - t^j - b_2^j + \varepsilon_{p2}^j, \\
L_1^j &= R^j + T_{trop}^j - T_{ion,1}^j + T + \lambda_1^j \Phi_{01} + c\dot{\Phi}_1 - t^j - \lambda_1^j \Psi_1^j - \lambda_1^j N_1^j + \varepsilon_{L1}^j, \\
L_2^j &= R^j + T_{trop}^j - \frac{n_1^2}{n_2} T_{ion,1}^j + T + \lambda_2^j \Phi_{02} + c\dot{\Phi}_2 - t^j - \lambda_2^j \Psi_2^j - \lambda_2^j N_2^j + \varepsilon_{L2}^j,
\end{aligned} \tag{1}$$

где R^j – расстояние между положениями фазовых центров антенн приёмника в момент измерения и спутника в момент предшествования (момент времени, предшествующий моменту измерения на время распространения сигнала от спутника к приёмнику), м;

T_{trop}^j – задержка распространения сигнала в тропосфере, м;

$T_{ion,1}^j$ – задержка распространения сигнала в ионосфере (в диапазоне L1), м;

T – смещение показаний часов приёмника в момент измерения относительно шкалы времени ГНСС, выраженное в метрах (одинаковое для всех измерений псевдодальности и псевдофазы приёмника по всем КА, но различное для разных ГНСС и приёмников), м;

B_1^j, B_2^j – кодовые задержки в аппаратуре приёмника (в общем случае различные для разных, приёмников, диапазонов частот и КА ГЛОНАСС в связи с технологией частотного разделения сигналов), м;

t^j – смещение показаний часов спутника в момент предшествования относительно шкалы времени ГНСС, выраженное в метрах;

b_1^j, b_2^j – кодовые задержки в аппаратуре спутника, м;

$\varepsilon_{p1}^j, \varepsilon_{p2}^j$ – случайные ошибки измерений псевдодальности, м;

$n_1 = 9, n_2 = 7$ – коэффициенты отношения несущих частот ГЛОНАСС в диапазонах L1,

$$L2 \frac{n_1}{n_2} = \frac{f_1^j}{f_2^j};$$

$\lambda_1^j = c/f_1^j \approx 19$ см, $\lambda_2^j = c/f_2^j \approx 24$ см – длины волны несущих колебаний (различные для разных КА ГЛОНАСС в связи с частотным разделением сигналов), м;

Φ_{01}, Φ_{02} – фазовые задержки в НАП (одинаковые для всех измерений в соответствующем диапазоне), цикл;

$c = 299792458$ м/с – скорость света в вакууме;

$\dot{\Phi}_1, \dot{\Phi}_2$ – линейный наклон фазо-частотной характеристики приёмника, цикл/Гц;

Ψ_1^j, Ψ_2^j – фазовые задержки в аппаратуре спутника, цикл;

$N_1^j, N_2^j \in \mathbb{Z}$ – целочисленные параметры псевдофазовой неоднозначности, цикл;

$\varepsilon_{L1}^j, \varepsilon_{L2}^j$ – случайные ошибки измерений псевдофазы, м.

В математических моделях (1) предполагается, что хорошо моделируемые систематические ошибки измерений, связанные со смещениями и вариациями фазовых центров антенн, релятивистскими и гравитационными смещениями, океаническими, полярными и твердотельными приливами в Земле, wind-up эффектом и вращением Земли корректно учтены, а ошибка многолучёвости отсутствует.

Для устранения влияния ионосферы в работе используются ионосферосвободные (ifr) линейные комбинации двухчастотных измерений. Так как при образовании ионосферосвободной комбинации псевдофаз эквивалентная длина волны псевдофазовых неоднозначностей такой комбинации существенно уменьшается и увеличивается вероятность аномальной ошибки, совместно с ионосферосвободными комбинациями псевдодальностей и псевдофаз обрабатывается кодово-фазовая MW-комбинация измерений (Мельбурна-Вуббены). Сравнение математических моделей ifr- P_3^j, L_3^j и MW-комбинаций A_4^j измерений ГЛОНАСС и ГНСС с кодовым разделением (на примере GPS) $P_3^{G,k}, L_3^{G,k}, A_4^{G,k}$ приведено в Таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение математических моделей измерений GPS и ГЛОНАСС (красным цветом выделены отличия ГЛОНАСС от GPS)

	Измерение	Геометрическая дальность	Тропосферная задержка	Смещение часов НАП	Кодовые задержки в НАП	Смещение часов КА и аппаратные задержки на КА	Целочисленные неоднозначности и начальные фазы	Случайные (шумовые) ошибки	
GPS	$P_3^{G,k} =$	$R^{G,k} + T_{trop}^{G,k}$	$+T^G + B_3^G$	$-(t^{G,k} + b_3^{G,k})$				$+\varepsilon_{P_3}^{G,k}$	Псевдодальность
	$L_3^{G,k} =$	$R^{G,k} + T_{trop}^{G,k}$	$+T^G$	$-(t^{G,k} + \lambda_3^G \psi_3^{G,k})$	$-\Delta n^G \lambda_3^G (N_1^{G,k} - \varphi_{01}^G)$	$-\Delta n^G \lambda_3^G (N_4^{G,k} - \varphi_{04}^G)$		$+\varepsilon_{L_3}^{G,k}$	Псевдофаза
	$A_4^{G,k} =$			$-B_{NL}^G$	$-(\lambda_4^G \psi_4^{G,k} - b_{NL}^{G,k})$	$-\lambda_4^G (N_4^{G,k} - \varphi_{04}^G)$		$+\varepsilon_{A_4}^{G,k}$	MW-комбинация
ГЛОНАСС	$P_3^j =$	$R^j + T_{trop}^j$	$+T + B_3^j$	$-(t^j + b_3^j)$				$+\varepsilon_{P_3}^j$	Псевдодальность
	$L_3^j =$	$R^j + T_{trop}^j$	$+T + c\dot{\varphi}_3$	$-(t^j + \lambda_3^j \psi_3^j)$	$-\Delta n \lambda_3^j (N_1^j - \varphi_{01})$	$-\Delta n \lambda_3^j (N_4^j - \varphi_{04})$		$+\varepsilon_{L_3}^j$	Псевдофаза
	$A_4^j =$			$c\dot{\varphi}_{WL} - B_{NL}^j$	$-(\lambda_4^j \psi_4^j - b_{NL}^j)$	$-\lambda_4^j (N_4^j - \varphi_{04})$		$+\varepsilon_{A_4}^j$	MW-комбинация

В Таблице 2 для переменных, относящихся к GPS введён верхний индекс G, а спутники GPS обозначены индексом k . Нижний индекс 3 означает, что переменная относится к ifr-комбинации, а 4 – к MW-комбинации;

$$\lambda_3^j = \frac{n_1 \lambda_1^j}{n_1^2 - n_2^2} = \frac{n_2 \lambda_2^j}{n_1^2 - n_2^2} \approx 5,3 \text{ см}, \quad \lambda_3^G = \frac{n_1^G \lambda_1^G}{(n_1^G)^2 - (n_2^G)^2} = \frac{n_2^G \lambda_2^G}{(n_1^G)^2 - (n_2^G)^2} \approx 0,63 \text{ см} - \text{длина волны}$$

ионосферосвободной комбинации псевдофазовых измерений;

$$\Delta n = n_1 - n_2 = 2, \quad n_1^G = 77, \quad n_2^G = 60 \quad \Delta n^G = n_1^G - n_2^G = 17;$$

$\lambda_4^j = (n_1 + n_2) \lambda_3^j \approx 84 \text{ см}, \quad \lambda_4^G = (n_1^G + n_2^G) \lambda_3^G \approx 86 \text{ см} - \text{длина волны WL-комбинации псевдофазовых измерений};$

WL и NL означают wide-lane и narrow-lane комбинации. Остальные обозначения соответствуют (1).

Анализ таблицы показывает, что основные различия между моделями состоят в том, что в GPS в отличие от ГЛОНАСС кодовые задержки в аппаратуре приёмника B_3^G , B_{NL}^G и длины несущих волн λ_3^G , λ_4^G не зависят от номера спутника, а также в GPS отсутствует понятие «наклон фазо-частотной характеристики приёмника» $\dot{\phi}_3$, $\dot{\phi}_{WL}$. В остальном модели совпадают.

Вторая глава посвящена рассмотрению особенностей математических моделей измерений ГЛОНАСС – наличию межлитерных задержек и недоопределённости систем уравнений, составленных по этим математическим моделям.

Для решения проблемы межлитерных задержек в работе предлагается использовать НАП одной модели от одного производителя, оборудованные одинаковыми антеннами. Вводится предположение о том, что в таком случае кодовые аппаратурные задержки у таких приёмников для разных КА ГЛОНАСС будут с точностью до неизвестной константы совпадать (с достаточной для практики точностью). Это предположение не противоречит опыту, известному из литературы, и позволяет существенно упростить математические модели кодовых и MW-комбинаций измерений таких приёмников.

Для проверки истинности этого предположения предлагается методика, состоящая из двух алгоритмов, которая позволяет сравнить кодовые аппаратурные задержки двух приёмников. Первый алгоритм основан на сравнении дробных частей усреднённой по времени MW-комбинации измерений пары приёмников по всем спутникам ГЛОНАСС. Он позволяет сравнить с точностью до константы и неопределённого целого числа длин волн λ_4^j не сами кодовые аппаратурные задержки на исходных частотах $B_{1,u}^j$, $B_{1,v}^j$, $B_{2,u}^j$, $B_{2,v}^j$ двух приёмников u и v , а их линейные narrow-lane (NL) комбинации (так как кодовые измерения входят в MW-комбинацию в виде NL-комбинации, куда помимо кодовых измерений входит WL-комбинация неоднозначных псевдофазовых измерений). Для этого не требуется никакая внешняя информация – только двухчастотные кодовые и псевдофазовые измерения. Результат сравнения кодовых аппаратурных задержек по этому алгоритму представлены на верхнем графике Рисунка 1. Показана зависимость разности

дробных частей NL-комбинации кодовых аппаратурных задержек от номера литеры КА ГЛОНАСС (так как одной букве соответствует два антиподных спутника, они показаны красным и синим цветом).

Второй алгоритм основан на обработке первых разностей измерений псевдодальностей пары близко расположенных приёмников с известными с высокой точностью координатами. В силу близкого расположения можно считать, что в первых разностях компенсируются атмосферные задержки сигналов и смещения показаний спутниковых часов и ошибки определения спутниковых орбит. По первым разностям измерений оценивается разность смещений показаний часов рассматриваемой пары приёмников. В результате в невязках остаётся разность кодовых аппаратурных задержек этих приёмников (с точностью до константы). Анализ невязок позволяет сравнить кодовые аппаратурные задержки приёмников. Для этого алгоритма достаточно широковещательных эфемерид, однако требуется близкое расположение приёмников. Результаты сравнения по этому алгоритму приведены на нижнем графике Рисунка 1.

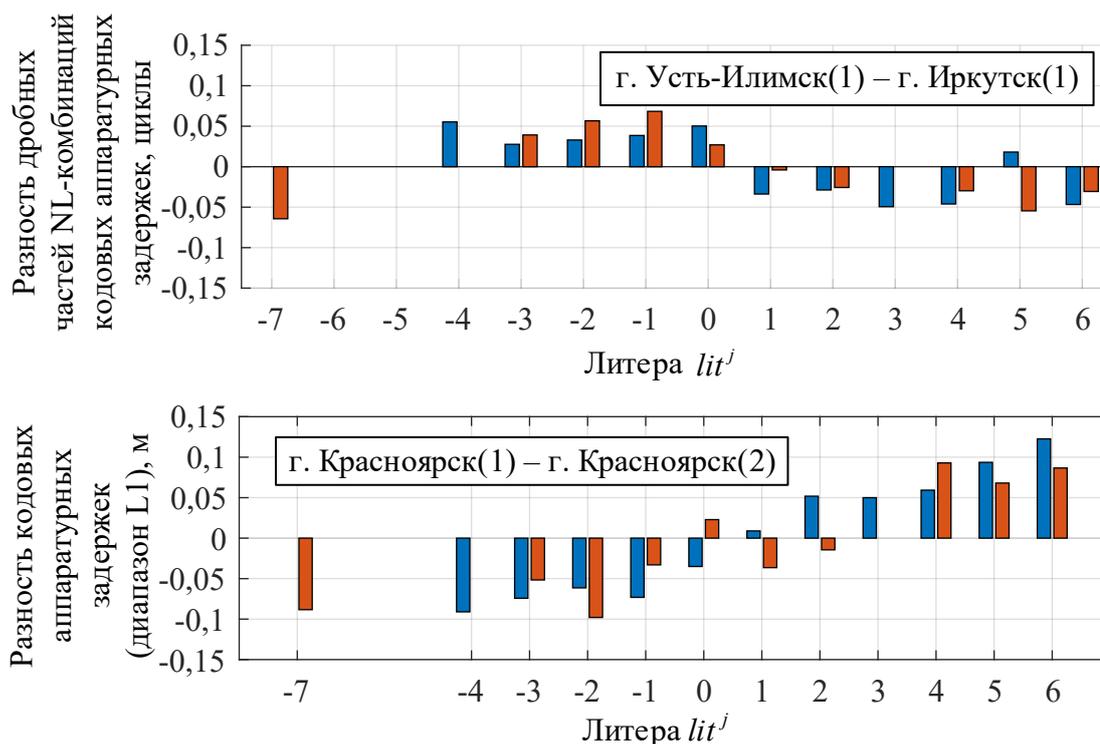


Рисунок 1 – Верхний график: оценка разности дробных частей NL-комбинаций кодовых задержек в НАП ГЛОНАСС (в циклах). Приёмники в г. Усть-Илимск (1) и г. Иркутск (1). Нижний график: оценка разности кодовых задержек в НАП ГЛОНАСС (в метрах). Приёмники (1) и (2) в г. Красноярск. Диапазон L1.

Результаты проведённых экспериментов, представленные на Рисунке 1, позволяют подтвердить предположение о том, что для рассматриваемых навигационных приёмников с точностью до константы совпадают кодовые аппаратурные задержки (такие приёмники называются в

работе «совместимыми»). Это позволяет упростить математические модели ионосферосвободных комбинаций измерений псевдодальностей $P_{3,m}^j$, м, псевдофаз $L_{3,m}^j$, м и MW-комбинаций $A_{4,m}^j$, м ГЛОНАСС m -го приёмника. Упрощение состоит в том, что кодовые аппаратурные задержки ГЛОНАСС, входящие в модели измерений в Таблице 2, можно разделить на задержки в приёмнике и на КА. Математически это выражается в разложении на два слагаемых: одно зависит только от номера приёмника m , а другое – только от номера КА ГЛОНАСС j :

$$\begin{aligned} B_{3,m}^j &= \Delta B_{3,m} + B_{3,R}^j, \\ B_{NL,m}^j &= \Delta B_{NL,m} + B_{NL,R}^j, \end{aligned} \quad (2)$$

где символом R обозначен приёмник, относительно которого проводилось сравнение остальных приёмников.

Таким образом от MJ переменных $B_{NL,m}^j$ и $B_{3,m}^j$ можно перейти к меньшему числу $M+J$ переменных $\Delta B_{NL,m}$, $B_{NL,R}^j$ и $\Delta B_{3,m}$, $B_{3,R}^j$ (M – общее число приёмников, J – общее число спутников ГЛОНАСС).

В соответствии с идеей «разделения часов» (подход decoupled clock, DC) необходимо так преобразовать модели измерений (Таблица 2), чтобы образовать новые переменные путём объединения кодовых и фазовых задержек со смещениями показаний часов для спутника и приёмника и провести аналогичное объединение для математической модели MW-комбинации измерений. В GPS при использовании модели с разделёнными часами фазовые задержки φ_{01}^G и φ_{04}^G обычно объединяются со смещениями показаний часов и MW-смещениями с образованием новых переменных «фазовые часы» и «смещение Мельбурна-Вуббены», так как длины волн несущих колебаний разных спутников совпадают.

Однако, так как в ГЛОНАСС длины волн зависят от номера спутника, провести такое объединение невозможно. Исходя из того, что структура уравнений ГЛОНАСС и GPS (Таблица 2) одинакова, а также того, что относительное различие длин волн сигналов ГЛОНАСС невелико ($\lambda_3^j \in (5,252; 5,276)$ см, $\lambda_4^j \in (84,034; 84,419)$ см), возникает стремление использовать известные методы решения задачи целочисленного ВАМО GPS в ГЛОНАСС. Поэтому для того, чтобы модели измерений GPS и ГЛОНАСС можно было представить в едином виде, проведём такое преобразование этих моделей, при котором происходит объединение целочисленных неоднозначностей N_1^j , N_4^j и $N_1^{G,k}$, $N_4^{G,k}$ с фазовыми задержками φ_{01} , φ_{04} и φ_{01}^G , φ_{04}^G соответственно с образованием новых действительных переменных. В таком случае с учётом (2) модель измерений ГЛОНАСС принимает упрощённый вид:

$$\begin{aligned}
P_{3,m}^j &= R_m^j + T_{trop,m}^j + T_{P,m}^j - t_P^j + \varepsilon_{P3,m}^j, \\
L_{3,m}^j &= R_m^j + T_{trop,m}^j + T_{L,m}^j - t_L^j - \Delta n \lambda_3^j \tilde{N}_{1,m}^j - n_2 \lambda_3^j \tilde{N}_{4,m}^j + \varepsilon_{L3,m}^j, \\
A_{4,m}^j &= B_{A4,m} - b_{A4}^j - \lambda_4^j \tilde{N}_{4,m}^j + \varepsilon_{A4,m}^j,
\end{aligned} \tag{3}$$

где m – номер НАП;

$T_{P,m} = T_m + \Delta B_{3,m}$, $T_{L,m} = T_m + c\dot{\varphi}_{3,m}$, $B_{A4,m} = c\dot{\varphi}_{WL,m} - \Delta B_{NL,m}$, $t_P^j = t^j + b_3^j - B_{3,R}^j$, $t_L^j = t^j + \lambda_3^j \psi_3^j$, $b_{A4}^j = \lambda_4^j \psi_4^j - b_{NL}^j + B_{NL,R}^j$ – смещения показаний ионосферосвободных кодовых и фазовых часов и смещения Мельбурна-Вуббены (MW-смещения) НАП и спутников ГЛОНАСС соответственно;

$\tilde{N}_{1,m}^j = N_{1,m}^j - \varphi_{01,m}$, $\tilde{N}_{4,m}^j = N_{4,m}^j - \varphi_{04,m}$ – новые действительные неоднозначности. При этом следует заметить, что все новые действительные неоднозначности $\tilde{N}_{1,m}^j$ и $\tilde{N}_{4,m}^j$, соответствующие одной станции, получают одинаковое действительное смещение $-\varphi_{01,m}$ и $-\varphi_{04,m}$ соответственно.

Таким образом, после упрощения вид модели измерений совместимой НАП ГЛОНАСС совпадает с видом соответствующей модели измерений GPS с разделёнными часами. Различия состоят только в физическом смысле некоторых переменных – смещений показаний фазовых часов и MW-смещений НАП, так как в уравнениях для ГЛОНАСС в отличие от GPS присутствует слагаемое, связанное с наклоном ФЧХ НАП ГЛОНАСС, а также то, что длины волн различных спутников ГЛОНАСС различаются (зависят от номера спутника j).

Системы линеаризованных уравнений в задаче целочисленного ВАМО, составленные с использованием математических моделей (3), недоопределены, то есть имеют бесчисленное множество решений. Однако они обладают важным свойством: ядра (нуль-пространства) матриц таких систем линеаризованных уравнений оказываются ортогональными тем осям системы координат, относительно которых откладываются практически интересные переменные – поправки к грубым оценкам координат НАП, использованных для линеаризации. Таким образом, оценки этих переменных оказываются одинаковыми для любого решения из множества решений системы линеаризованных уравнений. Это свойство позволяет получать однозначные оценки координат НАП при решении недоопределённых систем уравнений с помощью теории S-преобразования. Для нахождения этих оценок в соответствии с теорией S-преобразования пространство исходных переменных решаемой задачи необходимо спроектировать на специально выбранное S-пространство вдоль направления ядра системы линеаризованных уравнений. Размерность этого пространства выбирается равной рангу матрицы системы линеаризованных уравнений.

Свойства систем линеаризованных уравнений измерений псевдодальностей, псевдофаз и MW-комбинаций в GPS таковы, что результаты решения задачи ВАМО по модели с целочисленными неоднозначностями и по введённой модели с действительными неоднозначностями

являются одинаковыми (за счёт того, что в процессе решения оцениваются не исходные действительные неоднозначности, а их разности, которые являются целочисленными). Введённые модели ГЛОНАСС отличаются от моделей GPS только тем, что в моделях ГЛОНАСС длина волны зависит от номера спутника. Однако, так как относительное различие длин волн несущих колебаний, излучаемых спутниками ГЛОНАСС, невелико, в данной работе исследуется возможность использования методов обработки, известных для ГНСС с кодовым разделением, для обработки измерений ГЛОНАСС с частотным разделением. Математически такая возможность реализуется путём проектирования пространства исходных переменных вдоль ядра матрицы системы линеаризованных уравнений ГЛОНАСС на S-пространство, задаваемое так же, как это делается при решении задачи ВАМО в ГНСС с кодовым разделением, в частности как в GPS.

В третьей главе рассмотрена задача высокоточного абсолютного местоопределения с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений по сигналам ГЛОНАСС с частотным разделением. В основе решения задачи лежит идея проектирования пространства исходных переменных линеаризованной системы уравнений ГЛОНАСС вдоль ядра матрицы этой системы уравнений на S-пространство. S-пространство задаётся также, как для линеаризованной системы уравнений ГНСС с кодовым разделением. Рассмотрены также практические результаты обработки реальных навигационных измерений. Задача целочисленного ВАМО разделяется на две части – «сетевую» и «пользовательскую». Пользовательской называется задача определения высокоточных абсолютных координат потребителя с использованием двухчастотных кодовых и фазовых измерений и ВКП. Сетевой называется задача определения этих ВКП из обработки измерений сети наземных станций с известными координатами. В обеих задачах координаты спутников считаются известными с высокой точностью.

В главе описана математическая постановка этих задач и методика их решения на основе теории S-преобразования. При решении задач используется совместимая НАП, поэтому применяются упрощённые математические модели измерений (3).

Математическая постановка пользовательской задачи состоит в решении следующей недоопределённой линеаризованной системы уравнений:

$$\begin{aligned} dP_3^j &= h_x^j \Delta x + h_y^j \Delta y + h_z^j \Delta z + w^j \Delta D + T_P + \varepsilon_{P3}^j \\ dL_3^j &= h_x^j \Delta x + h_y^j \Delta y + h_z^j \Delta z + w^j \Delta D + T_L - \Delta n \lambda_3^j \tilde{N}_1^j - n_2 \lambda_3^j \tilde{N}_4^j + \varepsilon_{L3}^j \\ dA_4^j &= B_{A4} - \lambda_4^j \tilde{N}_4^j + \varepsilon_{A4}^j \end{aligned} \quad j = \overline{1, J}, \quad (4)$$

где dP_3^j , dL_3^j , dA_4^j – невязки ионосферосвободных комбинаций кодовых, псевдофазовых и MW-комбинаций измерений j -го спутника, м;

h_x^j , h_y^j , h_z^j – направляющие косинусы единичного вектора, ориентированного из точки фазового центра антенны j -го спутника в точку грубого местоположения НАП;

Δx , Δy , Δz – поправки к грубым координатам НАП, м;

w^j – функция отображения вертикальной тропосферной задержки в наклонную;

ΔD – нескомпенсированная часть вертикальной тропосферной задержки, м;

J – общее число видимых спутников.

При этом дальности до спутников, грубая оценка местоположения НАП и смещения показаний спутниковых часов считаются известными и учтёнными в невязках измерений.

Решение линеаризованной недоопределённой системы (4) при помощи теории S-преобразования с S-пространством, выбранным аналогично случаю обработки измерений GPS, порождает способ нестрого целочисленной оценки псевдофазовых неоднозначностей ГЛОНАСС. Нестрогость возникает вследствие различия длин волн спутников ГЛОНАСС. В результате решения пользовательской задачи целочисленного ВАМО ГЛОНАСС предлагаемым способом получается оценка следующего вектора:

$$\mathbf{x}_S = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta D \\ T_P \\ T_L - \Delta n \lambda_3^r \tilde{N}_1^r - n_2 \lambda_3^r \tilde{N}_4^r \\ B_{A4} - \lambda_4^r \tilde{N}_4^r \\ \tilde{N}_1^j - \frac{\mathbf{g}^j}{\mathbf{g}^r} \tilde{N}_1^r, j = \overline{1, J} \\ \tilde{N}_4^j - \frac{\mathbf{g}^j}{\mathbf{g}^r} \tilde{N}_4^r, j = \overline{1, J} \end{bmatrix}_{m \times 1} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta D \\ T_P \\ T_{L,S} \\ B_{A4,S} \\ \tilde{N}_{1,S}^j, j = \overline{1, J} \\ \tilde{N}_{4,S}^j, j = \overline{1, J} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $\mathbf{g}^j = 2848 + lit^j$, а lit^j – номер частотной литеры ГЛОНАСС (от -7 до +6).

Анализ полученных нестрого целочисленных оценок неоднозначностей $\tilde{N}_1^j - \frac{\mathbf{g}^j}{\mathbf{g}^r} \tilde{N}_1^r$ и $\tilde{N}_4^j - \frac{\mathbf{g}^j}{\mathbf{g}^r} \tilde{N}_4^r$ показывает, что для того, чтобы отличие комбинаций $\tilde{N}_1^j - \frac{\mathbf{g}^j}{\mathbf{g}^r} \tilde{N}_1^r$ и $\tilde{N}_4^j - \frac{\mathbf{g}^j}{\mathbf{g}^r} \tilde{N}_4^r$ от целых чисел не превышало 0,1 цикла необходимо, чтобы выполнялись условия $|N_4^r| \leq |N_4^r|_{\max}$, $|N_1^r| \leq |N_1^r|_{\max}$ где $|N_4^r|_{\max} = |N_1^r|_{\max} \approx 21,85$. Ошибка порядка 0,1 цикла оказывается сравнимой со случайной ошибкой измерений, поэтому ей можно пренебречь. Благодаря этому возможно применение алгоритмов разрешения неоднозначности (LAMBDA-метод) для уменьшения времени сходимости решения.

Таким образом, для реализации режима целочисленного ВАМО по измерениям ГЛОНАСС необходимо минимизировать величину исходных псевдофазовых неоднозначностей, например, с помощью согласования псевдофазовых измерений с кодовыми.

Под пользовательским решением понимается результат рекуррентного оценивания (калмановской фильтрации) оцениваемых переменных уравнения пользовательской задачи (4). Основными характеристиками пользовательского решения являются его стабильность, точность и оперативность (время сходимости или время до правильного разрешения неоднозначности).

Для оценки оперативности местоопределения процесс сходимости при обработке измерений реальных навигационных приёмников «сбрасывался» в априорное состояние каждые 45 минут. Результаты представлены на Рисунке 2, где показаны 45-минутные интервалы сходимости действительного и целочисленного решения пользовательской задачи по измерениям только сигналов ГЛОНАСС (слева) и совместном использовании ГЛОНАСС и GPS (справа).

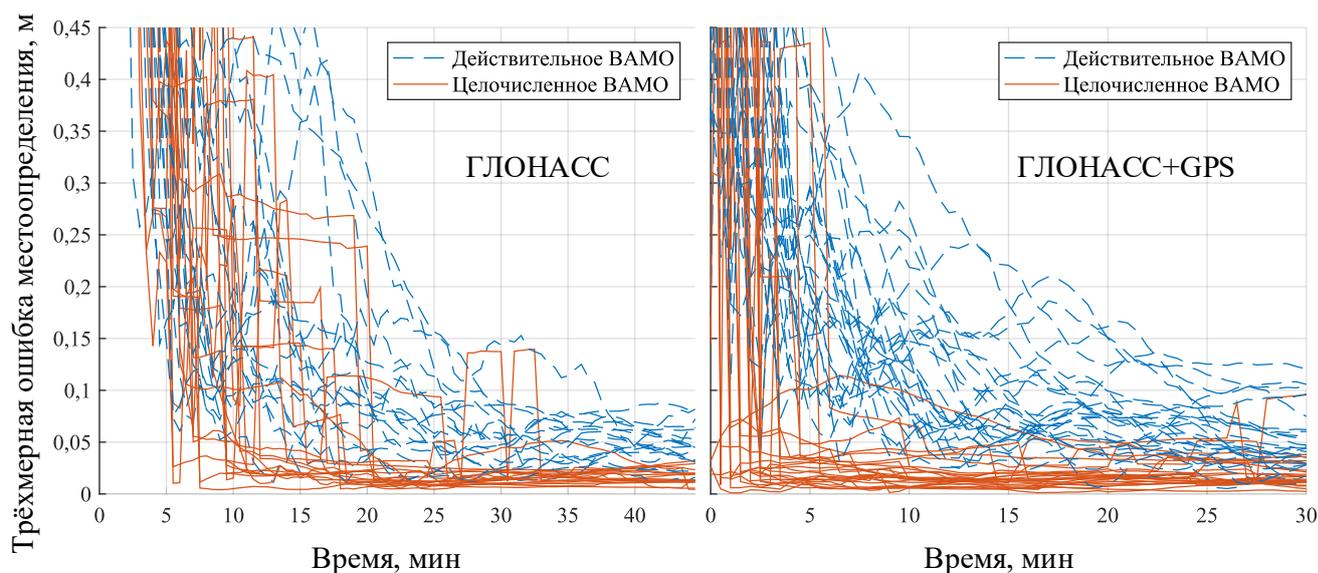


Рисунок 2 – График зависимости от времени трёхмерной ошибки местоопределения при периодическом сбросе процесса фильтрации для демонстрации оперативности местоопределения при целочисленном ВАМО (красная сплошная кривая) по сравнению с действительным ВАМО (синяя пунктирная кривая). Слева – при использовании ГЛОНАСС, справа – при совместном использовании ГЛОНАСС и GPS

Из Рисунка 2 видно, что время сходимости целочисленного решения (время до правильного разрешения неоднозначности) при использовании только ГЛОНАСС составляет от 5 до 20 минут (левый график). При этом по достижении сходимости трёхмерная ошибка целочисленного решения не превышает 5 см, в то время как ошибка действительного решения даже после 45 минут непрерывной фильтрации лежит в интервале от 3 до 10 см. При этом в решении присутствуют

аномальные ошибки (выбросы в районе 25-35 минут). Таким образом, Рисунок 2 показывает возможность оперативного целочисленного ВАМО по сигналам ГЛОНАСС.

Совместное использование ГЛОНАСС и GPS позволяет ещё больше повысить оперативность местоопределения – от мгновенного (одномоментного) правильного разрешения неоднозначности до 5-минутной сходимости (Рисунок 2, правый график).

Так как в процессе обработки измерений возможны аномальные ошибки (неправильное разрешение неоднозначности) и координаты потребителя оцениваются рекуррентно как константы, трудно адекватно оценить точность такого местоопределения. Для оценки потенциальной точности местоопределения используется следующий подход: сначала на всём интервале времени обработки измерений вычисляется целочисленные оценки псевдофазовых неоднозначностей (при фильтрации в прямом и обратном направлении по времени). Затем, когда значения неоднозначностей становятся известны, они корректируют исходные псевдофазовые измерения и получаются «однозначные» псевдофазовые измерения. По таким «однозначным» псевдофазовым измерениям независимо на каждый момент времени вычисляются МНК-оценки координат приёмника, вертикальной тропосферной задержки и смещений показаний его фазовых часов. За счёт того, что такие оценки независимы на каждый момент времени, можно вычислить математическое ожидание (МО) и дисперсию (среднеквадратическое отклонение, СКО) ошибок оценок координат. На Рисунке 3 приведён график типа «мишень» ошибок местоопределения (в горизонтальной плоскости) при таком подходе. Жёлтой точкой показано МО (3,54 мм в направлении запад-восток, 4,31 мм в направлении юг-север), радиус красной окружности равен СКО (2 см).

Результаты, представленные на Рисунках 2 и 3 свидетельствуют о корректности математического аппарата, адекватности разработанных в диссертации математических моделей реальным измерениям, а также о корректности вычисления временных поправок в сетевой задаче.

Численные оценки потенциальной точности местоопределения в проведённых экспериментах сведены в Таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение потенциальной точности местоопределения при отдельном и совместном использовании ГЛОНАСС и GPS

Используемая ГНСС	МО ошибки в направлении, мм			СКО ошибки, мм		Средняя величина PDOP
	запад-восток	юг-север	высота	в плане	по высоте	
ГЛОНАСС	3,54	4,31	11,81	20,61	108,28	18,27
GPS	-2,11	2,91	-10,85	8,27	62,63	7,91
ГЛОНАСС+GPS	1,12	3,44	3,73	5,68	65,23	4,22

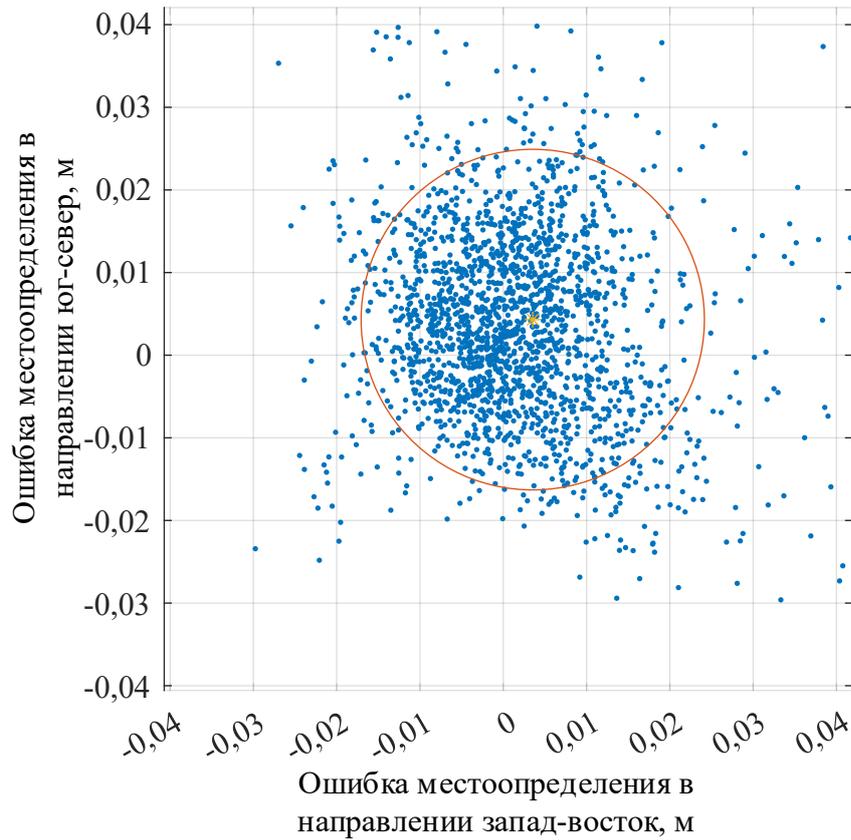


Рисунок 3 – График ошибок местоопределения в горизонтальной плоскости типа «мишень» для оценки потенциальной точности местоопределения при использовании ГЛОНАСС.

Из Таблицы 3 видно, что МО ошибок местоопределения в плане при раздельном и совместном использовании ГЛОНАСС и GPS находится примерно на одном уровне. Совместное использование ГЛОНАСС и GPS позволяет значительно уменьшить МО ошибок по высоте. ГЛОНАСС уступает по точности местоопределения GPS в части СКО ошибок. Это объясняется тем, что в штатной группировке ГЛОНАСС меньшее число спутников, чем в GPS. Кроме того, так как в настоящей работе используются ионосферосвободные комбинации измерений, которые требуют наличия измерений одновременно в двух диапазонах, число доступных КА ГЛОНАСС ещё сильнее уменьшается.

Более высокие значения геометрического фактора PDOP от 4 до 20 (в сравнении с 1-4 при стандартном автономном местоопределении) объясняются тем, что в данном случае оцениваются не только координаты приёмника, но и вертикальная часть тропосферной задержки.

Математическая постановка сетевой задачи состоит в решении следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned}
 dP_{3,m}^j &= w_m^j D_m + T_{P,m} - t_P^j + \varepsilon_{P3,m}^j & m = \overline{1, M}, \\
 dL_{3,m}^j &= w_m^j D_m + T_{L,m} - t_L^j - \Delta n \lambda_3^j \tilde{N}_{1,m}^j - n_2 \lambda_3^j \tilde{N}_{4,m}^j + \varepsilon_{L3,m}^j & j = \overline{1, J_m}, \\
 dA_{4,m}^j &= B_{A4,m} - b_{A4}^j - \lambda_4^j \tilde{N}_{4,m}^j + \varepsilon_{A4,m}^j
 \end{aligned} \quad (6)$$

где $dP_{3,m}^j$, $dL_{3,m}^j$, $dA_{4,m}^j$ – невязки ионосферосвободных комбинаций кодовых, псевдофазовых и MW-комбинаций измерений j -го спутника, m -й станции сети, m ;

M – общее число станций сети,

J_m – число спутников, видимых m -й станцией.

Остальные обозначения соответствуют пояснению к (1), (3) и (4). При этом координаты спутников и станций считаются известными и учтёнными в невязках измерений.

Недоопределённая система (6) была решена с помощью теории S-преобразования таким же способом, как и для пользовательской задачи. При этом использовались алгоритмы целочисленного разрешения неоднозначности. При решении пользовательской задачи были использованы оценки смещений показаний спутниковых часов, полученные в сетевой задаче после разрешения целочисленной неоднозначности (целочисленные оценки). Успешное решение пользовательской задачи подтверждает корректность решения сетевой. Примеры оценок смещений показаний часов для одного из спутников ГЛОНАСС приведены на Рисунке 4.

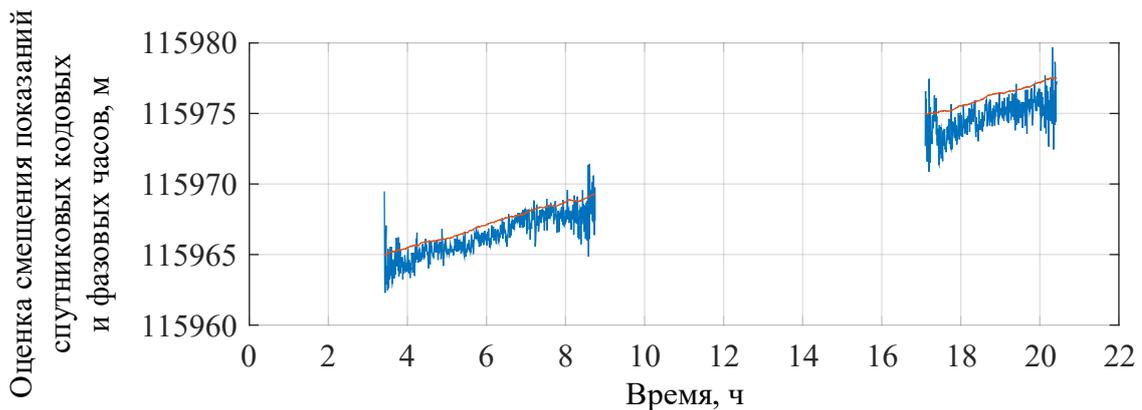


Рисунок 4 – График зависимости от времени оценок смещений показаний кодовых (синяя кривая) и фазовых (красная кривая) спутниковых часов, полученных в результате решения сетевой задачи.

На Рисунке 4 синим цветом показаны оценки смещений показаний кодовых часов КА ГЛОНАСС, а красным – фазовых. Так как используется локальная сеть, спутники не находятся в зоне видимости этой сети непрерывно, с связи с этим оценки смещений часов в течение суток прерываются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и реализована в виде специального программно-математического обеспечения методика решения задачи целочисленного ВАМО по измерениям сигналов ГЛОНАСС с частотным разделением. Достигнута цель работы: использование разработанной методики

позволяет сократить время сходимости решения до сантиметрового уровня до 5-20 минут при использовании только измерений сигналов ГЛОНАСС с частотным разделением. Кроме того, получены следующие основные результаты:

1) Повышение вероятности правильного разрешения неоднозначности и ещё более сильное сокращение времени сходимости – от мгновенного правильного разрешения до 5-7-минут при совместном использовании сигналов ГЛОНАСС с частотным разделением и GPS.

2) Применение аппарата линейной алгебры и понятий линейных векторных пространств (теории S-преобразования) позволило изложить подход к решению как сетевой, так и пользовательской задачи по сигналам любой ГНСС как с частотным (ГЛОНАСС L1, L2), так и с кодовым разделением (GPS, GALILEO, BEIDOU, ГЛОНАСС L3) в едином виде.

3) Разработан способ нестрого целочисленной оценки псевдофазовых неоднозначностей ГЛОНАСС, при условии, что величины исходных псевдофазовых неоднозначностей достаточно малы. Такой способ оценки не требует существенной модификации программного обеспечения, предназначенного для работы с ГНСС с кодовым разделением.

4) Предложена методика оценки различия величин кодовых задержек в навигационной аппаратуре различных приёмников ГЛОНАСС. Для рассматриваемой однородной сети станций подтверждено совпадение величин этих задержек.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты работы изложены в 5 статьях в ведущих рецензируемых изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук ВАК и 2 в сборниках тезисов докладов международных научно-технических конференций, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

1 Бабурин, А.А. Алгебраические основы обработки измерений при высокоточном абсолютном местопределении с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений по сигналам ГЛОНАСС с частотным разделением каналов / А.А. Бабурин // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2022. – Т. 9, вып. 4. – С. 47–58. – DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.9.4.47.58. EDN QXKSUY.

2 Бабурин, А.А. Определение временных корректирующих поправок для высокоточного абсолютного местопределения с разрешением целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений по сигналам ГЛОНАСС с частотным разделением каналов / А.А. Бабурин // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2023. – Т. 10, вып. 1. – С. 63–77. DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.10.1.63.77. – EDN BEPUIC.

3 Бабурин, А.А. Методы целочисленной оценки псевдофазовых неоднозначностей ГЛОНАСС / А.А. Бабурин. – Текст : электронный // Труды МАИ : электронный журнал. – 2023. – №130. – DOI 10.34759/trd-2023-130-16. – EDN KXFSBV. – URL: https://mai.ru/upload/iblock/105/n5fdg3smbxuk90ul7m02ux9f2ca924ue/16_Baburin.pdf (дата обращения: 16.12.2023).

4 Поваляев, А.А. Применение теории решетчатых упаковок в задаче определения временных корректирующих поправок для высокоточного абсолютного местоопределения по ионосферосвободным измерениям в ГНСС с кодовым разделением / А.А. Поваляев, А.А. Бабурин, А.Н. Подкорытов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2021. – Т. 8, вып. 3. – С. 48-62. – DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.3.48.62. EDN EALNOX.

5 Поваляев, А.А. Применение теории решетчатых упаковок в задаче высокоточного абсолютного местоопределения по ионосферосвободным измерениям параметров сигналов ГНСС с кодовым разделением / А.А. Поваляев, А.А. Бабурин, А.Н. Подкорытов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2021. – Т. 8, вып. 2. – С. 51-61. – DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.2.51.61. EDN NKAFTF.

6 Бабурин, А.А. Высокоточное абсолютное местоопределение в ГНСС с разрешением целочисленной неоднозначности по измерениям ГЛОНАСС и GPS: сравнительный анализ / А.А. Бабурин, А.Н. Подкорытов, А.А. Поваляев // Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий: Тезисы докладов XI Всероссийской научно-технической конференции. – Москва: АО «Российские космические системы», 2023.

7 Бабурин, А.А. Применение теории решетчатых упаковок в задаче высокоточного абсолютного местоопределения по ионосферосвободным измерениям параметров сигналов ГНСС с кодовым разделением / А.А. Бабурин, А.А. Поваляев, А.Н. Подкорытов // Метрология времени и пространства. Материалы X Международного симпозиума, Менделеево, Московская область, 6-8 октября 2021 г. – Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». – 2021. – ISBN 978-5-903232-90-1.

8 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023682719 Российская Федерация. Программный комплекс высокоточного абсолютного местоопределения потребителей с разрешением целочисленной неоднозначности по измерениям сигналов глобальных навигационных спутниковых систем / Бабурин, А.А., Поваляев, А.А. ; заявитель и правообладатель Акционерное общество «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем» (АО Российские космические системы). – №2023682039 ; заявл. 23.10.2023 ; опубл. 30.10.2023. – 1 с.