

На правах рукописи

Долин Сергей Владимирович



Разработка методики коллаборативного позиционирования объектов
по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем

1.6.22. Геодезия

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий».

Научный руководитель – кандидат технических наук Липатников Леонид Алексеевич.

Официальные оппоненты:

Мустафин Мурат Газизович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», заведующий кафедрой инженерной геодезии;

Устинов Александр Валерьевич, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилова», ассистент кафедры «Гидромелиорация, природообустройство и строительство в АПК».

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет по землеустройству» (г. Москва).

Защита диссертации состоится 29 октября 2024 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»: <https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/dolin-sergey-vladimirovich/>
Автореферат разослан 22 августа 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.
Подписано в печать 20.06.2024. Формат 60 × 84 1/16.
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 78.
Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 10.
Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. С каждым годом расширяется область применения технологий глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Увеличение объемов информации порождает новые вызовы для разработчиков инфраструктуры высокоточного позиционирования, главные из которых связаны с повышением оперативности определения координат и обеспечением глобального беспшовного навигационного поля.

Кроме того, наблюдается заметное снижение стоимости навигационных устройств, позволяющих обеспечить субдециметровый уровень точности определения координат. Примерами таких решений могут быть устройства, созданные на базе навигационных микросхем компаний Navis или U-Blox. С 2018 г. появилось направление высокоточного позиционирования смартфонов. Появлению поспособствовали компании Broadcom и Xiaomi, выпустившие первый в мире смартфон, оснащенный микросхемой с возможностью навигации по двухчастотным фазовым ГНСС-измерениям.

По оценке Европейского космического агентства, спрос на высокоточную навигационную информацию будет увеличиваться, а секторы экономики, которые ранее не использовали ГНСС-технологии, будут расширять взаимодействие с этой информацией.

Современные требования к глобальному высокоточному позиционированию в режиме реального времени, исходя из анализа исследований и запросов производства, можно сформулировать следующим образом:

- определение среднеквадратических ошибок (СКО) по внутренней сходимости координат в кинематическом режиме не более 20 см и не более 10 см для статического режима;
- время, необходимое на получение координат с указанными СКО, не более 2 минут;

- время, необходимое для восстановления указанных значений СКО после прерывания приема ГНСС-сигналов, не более 5 с;
- глобальность и непрерывность высокоточного навигационного поля;
- минимальный объем данных, передаваемых по телекоммуникационным сетям.

К общепринятым и применяемым в производстве технологиям высокоточного определения координат посредством ГНСС в режиме реального времени относятся:

- SBAS – технология функциональных дополнений космического базирования (СФДК) на основе стандартов ICAO;
- Precise Point Positioning (PPP) на основе поправок в пространстве состояния системы (ПСС) (англ. SSR – State-Space Representation);
- Real Time Kinematic (RTK) – реализация относительного метода в режиме реального времени на основе поправок в пространстве ГНСС-измерений.

Для высокоточной навигации в режиме реального времени и геодезии наиболее перспективными являются технологии на основе методов PPP и RTK.

Каждый из методов имеет ряд особенностей по реализации высокоточного позиционирования, которые в совокупности не позволяют решать задачи новых и потенциальных пользователей, что приводит к потребности в разработке методики высокоточного позиционирования, удовлетворяющей всем требованиям к глобальному высокоточному позиционированию в режиме реального времени, что говорит об актуальности защищаемой темы диссертации.

Степень разработанности темы. В России работы по тематике высокоточного координатного обеспечения ведутся в рамках реализации российской Системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) в АО «Российские космические системы», а также в АО «ГЛОНАСС» в рамках проекта «КОНСУЛ». Вклад в развитие инфраструктуры и методов высокоточного позиционирования, в том числе PPP и PPP-RTK, внесли Антонович К. М., Виноградов А. В., Войтенко А. В.,

Дворкин В. В., Генике А. А., Глухов П. Б., Голубев А. Н., Жигулин А. Ю., Карутин С. Н., Лопатко О. Е., Першин Д. Ю., Побединский Г. Г., Подкорытов А. Н., Сурнин Ю. В., Мустафин М. Г., Устинов А. В. Значительный вклад в создание и развитие методов PPP и PPP-RTK внесли следующие зарубежные авторы: Abdelsalam M., Burbidge M., Chen K., Gao Y., Guan Z., Khodabandeh A., Nacer N., Rizos C., Cranenbroeck J., Selsaten V., Sunil B., Shuyang C., Wang J., Wübbena, G., Schmitz M., Bagge A. и др. Несмотря на возросший интерес к данной теме и активизацию разработок, тема остается актуальной, так как существующие технологии высокоточного позиционирования не отвечают перспективным требованиям потребителей и не обеспечивают покрытия значительной части территории России высокоточным навигационным полем.

В 2019 г., в рамках рабочей недели, проводимой Международной федерацией геодезистов (МФГ) (англ. FIG – International Federation of Surveyors), группой ученых во главе Ризосом К. и экспертом в области спутниковой навигации Краненбруком Дж. ван была предложена концепция коллаборативного позиционирования, связанная с внедрением нового подхода к организации наземной инфраструктуры высокоточного координатного обеспечения на основе ГНСС. Одним из защищаемых положений диссертационной работы является дальнейшее развитие и практическая реализация этой концепции.

Цель исследования – разработка методики коллаборативного позиционирования (КП) объектов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем, обеспечивающей требуемую точность и соответствующей перспективным требованиям потребителей высокоточной навигации.

Задачи исследования:

– анализ состояния вопроса и теоретическое обоснование методики коллаборативного позиционирования объектов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем;

– разработка методики коллаборативного позиционирования объектов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем на основе предложенного в ходе исследования алгоритма инициализации фильтра Калмана для метода PPP;

– модификация системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) метода PPP для учета дифференциальных кодовых задержек в режиме реального времени из потока поправок ПСС для систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo в свободном программном обеспечении RTKLIB;

– обеспечение соответствия методики КП перспективным требованиям потребителей высокоточной навигационной информации в режиме реального времени: определение координат с СКО по внутренней сходимости в кинематическом режиме не более 20 см и не более 10 см для статического режима; время, необходимое на получение координат с указанными СКО, не более 2 минут; время, необходимое для восстановления указанного уровня СКО после прерывания приема сигналов ГНСС, не более 5 с; глобальность и непрерывность высокоточного навигационного поля; минимальный объем данных, передаваемых по телекоммуникационным сетям;

– экспериментальная оценка эффективности сервиса коллаборативного позиционирования и методики в сравнении с классическими методами и подходами.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является позиционирование с использованием ГНСС-технологий. Предмет исследования – методика коллаборативного позиционирования объектов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем, обеспечивающая требуемую точность и соответствующая перспективным требованиям потребителей высокоточной навигационной информации.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

– разработана методика коллаборативного позиционирования объектов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем, впервые реализующая кон-

цепцию коллаборативного позиционирования, предложенную в 2019 г. Риззосом К. и Кроненбруком Дж. ван, согласно которой в роли источника поправок в сети может выступать ГНСС-аппаратура любого из пользователей;

– предложен новый способ инициализации расширенного фильтра Калмана для метода PPP в реализации методики коллаборативного позиционирования объектов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем, при котором априорная информация для фильтра Калмана поступает из оптимизационного решения уравнения двойных разностей фаз несущей.

Теоретическая значимость заключается в разработке управляемой комбинации существующих методов высокоточного позиционирования PPP и RTK на основе методики коллаборативного позиционирования объектов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем, позволяющей определять координаты с СКО по внутренней сходимости в кинематическом режиме не более 20 см и не более 10 см для статического режима, сокращать время получения координат с указанной точностью, восстанавливать измерения с указанной точностью после прерывания приема сигналов ГНСС, в течение 5 с, обеспечивать глобальность и непрерывность высокоточного навигационного поля, передавая минимальный объем данных.

Разработан критерий оптимизации решения метода PPP в реализации методики коллаборативного позиционирования объектов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем.

Практическая значимость заключается в разработке методики и создании условий для существенного расширения сферы применения высокоточного позиционирования с помощью ГНСС. В отличие от ранее использовавшихся методов, применяемых преимущественно в решении геодезических задач, новая методика предназначена для широкого спектра применений, включая навигацию беспилотных транспортных систем и предоставление различных услуг на основе высокоточ-

ного позиционирования. Расширение области применения предполагается за счет следующих новых свойств КП: повышенная надежность навигационного решения, обусловленная дублированием элементов системы и сравнением разных типов решения в режиме реального времени; многократное снижение нагрузки на телекоммуникационную сеть (в сравнении с РТК) в случае подключения от нескольких сотен до десятков тысяч пользователей одновременно на ограниченном участке местности, например, в крупном городе; повсеместное покрытие высокоточным навигационным полем (на первом этапе – в пределах действия сетей сотовой связи) за счет применения метода PPP; сокращение времени инициализации высокоточного решения до значений, характерных для метода РТК.

Методология и методы исследований. Методологическую основу исследования составили методы статистической обработки результатов измерений, методы решения задач космической геодезии. Теоретическая база исследования: теория математической обработки геодезических измерений, алгоритм расширенного фильтра Калмана. Эмпирической базой исследования являлись: координаты наземных измерительных пунктов (НИП) Международной ГНСС-службы (МГС) (англ. IGS – International GNSS-service), созвездие навигационных космических аппаратов (НКА) GPS, ГЛОНАСС, Galileo, результаты ГНСС-измерений, сервисы передачи поправок в пространстве состояния системы ПСС.

Положения, выносимые на защиту:

а) разработка новой методики коллаборативного позиционирования объектов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем, позволяющей обеспечить повсеместное покрытие высокоточным навигационным полем; многократно сократить нагрузку на телекоммуникационную сеть; обеспечить время инициализации и точность определения координат, характерные для метода РТК;

б) модификация системы линейных алгебраических уравнений метода PPP для применения дифференциальных кодовых задержек в реальном времени из по-

тока поправок ПСС для систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo, позволяющая значительно сократить время сходимости решения при многосистемных ГНСС-измерениях в режиме реального времени, представленная в открытом исходном коде на основе программной библиотеки RTKLIV для обработки ГНСС-измерений в режиме реального времени.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тематика диссертации соответствует следующим областям исследований: 4 – Геодезические (глобальные) навигационные спутниковые системы (ГНСС) и технологии. Формирование активной координатно-временной инфраструктуры на основе ГНСС. Методы и технологии высокоточного определения местоположения и навигации по сигналам спутниковых навигационных систем. Геодезические системы наземного, морского и космического базирования для определения местоположения и навигации подвижных объектов геопространства. Многосистемные и высокоскоростные (высокочастотные) ГНСС приложения. ГНСС рефлектометрия; 5 – Разработка новых принципов, методов, технических средств и технологий геодезических измерений для определения геометрических и физических параметров Земли, ее поверхности, объектов, явлений и процессов на ней, в том числе для производства наземных топографических съемок паспорта научной специальности 1.6.22. Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России по техническим наукам.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Методика коллаборативного позиционирования была испытана на реальных объектах в ходе псевдокинематических и кинематических тестов. В псевдокинематических тестах позиционирование выполнялось в кинематическом режиме на неподвижных объектах – станциях сети МГС и Подкомиссии по региональной системе отсчета для Европы (ПРСОЕ) (англ. – Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe (EUREF)). Кинематические тесты выполнены на автомобиле в условиях городской среды. Точность решения определялась по внешней сходимости с эталоном. В псев-

докинематических тестах в качестве эталона использовались координаты пунктов из каталогов ITRF2020, в кинематических тестах использовался эталонный трек, полученный из постобработки относительным методом по данным геодезического ГНСС-приемника Stonex S800A. Таким образом, представленные результаты обладают высокой степенью достоверности.

Результаты исследований и основные положения диссертации обсуждались и были одобрены на международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (2021–2024 гг., г. Новосибирск); на рабочем собрании научно-исследовательского центра Минобороны России (2021 г., г. Новосибирск); Национальной научно-практической конференции «Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения» (2023 г., г. Новосибирск); XXVI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» (2024 г., г. Санкт-Петербург); XXXI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам (2024 г., г. Санкт-Петербург).

Основные результаты диссертационного исследования использованы в СЧ НИР «ГЕОТЕХ-КВАНТ» 121111600209-4, а также в учебном процессе на кафедре космической и физической геодезии ФГБОУ ВО «СГУГиТ» при изучении специальных дисциплин студентами направления «Геодезия и дистанционное зондирование» и при выполнении курсовых и дипломных работ.

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические положения и результаты исследований представлены в 6 публикациях, из которых 2 статьи – в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 1 статья – в издании, входящем в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus, 1 – свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 114 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы, списка сокращений и условных обозначений, содержит 13 таблиц и 22 рисунка. Список литературы включает 103 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первом разделе рассмотрены методы дифференциального позиционирования в реальном времени (Precise Point Positioning) PPP и (Real-Time Kinematic) RTK. Отмечено, что оба метода позволяют выполнять оценивание положения некоторой точки пространства, в реальном времени по результатам фазовых и кодовых ГНСС-измерений с использованием потока эфемеридно-временной информации (ЭВИ): эфемерид, поправок бортовых шкал времени (БШВ) навигационных космических аппаратов и дифференциальных кодовых задержек (ДКЗ), сервиса реального времени МГС (СРВ-МГС). Для реализации позиционирования в режиме реального времени, доступ дифференциальным поправкам осуществлялся при помощи кастера сетевой транспортировки RTCM через интернет-протокол (англ. – Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) (NTRIP-кастер). Каждый из методов обеспечивает в кинематическом режиме определение координат с СКО в проекциях на оси горизонтальной топоцентрической системы координат каждого НИП в направлениях: на север (N) и на восток (E) порядка 10 см и менее, вверх по нормали к эллипсоиду GRS80 (U) на уровне 15–20 см.

В процессе исследования доказано, что для обеспечения заданной точности в реальном времени становится возможным при соблюдении ряда условий, в числе которых при реализации метода PPP необходимо учитывать время сходимости решения порядка 20–30 минут, необходимость использования двухчастотной фазовой аппаратуры (ДФА). Для выполнения позиционирования методом RTK необходимо

учитывать ограниченность область действия от базовой станции или сети базовых станций, не более 50 км, обеспечивать синхронность выполнения измерений базовой и мобильной станциями.

Исходя из проведенного анализа научно-технических работ и рынка высокоточной навигации, обосновано создание новой методики позиционирования. Область применения высокоточного позиционирования с каждым годом расширяется, включая новые применения, не относящиеся к спутниковой геодезии, но фактически использующие ее методы и соответствующие ей по точности. К таким применениям относятся высокоточная навигация автомобилей, железнодорожного транспорта, сельскохозяйственной техники, морских беспилотных аппаратов, БПЛА и т. д. С расширением рынка высокоточной навигации, инфраструктура, поддерживающая ее, не изменяется, а остается ориентированной на решение геодезических задач, сохраняя классический подход, что препятствует массовому применению высокоточной навигации. Примером этого является неравномерное размещение базовых станций ГНСС, которые концентрируются вблизи городов, что усложняет применение метода RTK на необжитых территориях. Для различных реализаций методик PPP позиционирование в режиме реального времени представляется затруднительным или невозможным, так как получение высокоточного, а главное – надежного решения в данном методе требует длительного времени сходимости решения, что не согласуется с понятием высокоточного позиционирования в режиме реального времени. Отмечено, что несмотря на наличие ограничивающих факторов, путем комбинирования методы могут дополнять друг друга, используя преимущества каждого из них.

Во втором разделе предложена новая методика, получившая название «коллаборативное позиционирование». Термин «коллаборативное» подразумевает взаимодействие между пользователями, где пользователи с низкими значениями СКО взаимодействуют с теми, кто еще не достиг высокоточного определения координат. В ис-

следовании доказано, что достижение заданной точности можно обеспечить за счет инициализации расширенного фильтра Калмана в методе PPP посредством передачи координат и стандартных отклонений, полученных из решения относительным методом в режиме реального времени с подвижной базовой станцией (ПБС). Такой подход, при котором каждый из пользователей может находиться в статусе ПБС, впервые был представлен в 2019 г. Риззосом К. и Краненбруком Дж. ван и получил название «collaborative positioning».

В результате анализа способов обработки ГНСС-измерений в реальном времени предложен вариант с инициализацией расширенного фильтра Калмана для метода PPP в реализации методики КП в формулах (1), (2), при котором в векторе оценок подставляются координаты, полученные из решения относительным методом в режиме реального времени с подвижной базовой станцией, в ковариационную матрицу вектора подставляются дисперсии использованных оценок

$$\hat{x}_{k_{DD}} = \begin{bmatrix} X_{k_{DD}} \\ Y_{k_{DD}} \\ Z_{k_{DD}} \\ \dots \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$P_{k_{DD}} = \begin{bmatrix} \sigma_{X_{k_{DD}}}^2 & & & \\ & \sigma_{Y_{k_{DD}}}^2 & & \\ & & \sigma_{Z_{k_{DD}}}^2 & \\ & & & \dots \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $\hat{x}_{k_{DD}}$ – вектор оценок параметров, полученный из решения относительным методом в режиме реального времени с ПБС, в момент времени k ;

$X_{k_{DD}}, Y_{k_{DD}}, Z_{k_{DD}}$ – оценки координат из решения относительным методом в режиме реального времени с ПБС, в момент времени k ;

$P_{k_{DD}}$ – ковариационная матрица, с дисперсиями координат из решения относительным методом в режиме реального времени с ПБС, в момент времени k ;

$\sigma_{X_{k_{DD}}}^2, \sigma_{Y_{k_{DD}}}^2, \sigma_{Z_{k_{DD}}}^2$ – дисперсии координат из решения относительным методом в режиме реального времени с ПБС, в момент времени k ;

После инициализации расширенного фильтра Калмана по методике КП вектор состояния x для неизвестных параметров модели и его ковариационная матрица P могут быть оценены с помощью вектора измерения y_k в эпоху k :

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k(y_k - h(\hat{x}_k(-))), \quad (3)$$

$$P_k(+) = (I - K_k H(\hat{x}_k(-)))P_k(-), \quad (4)$$

$$K_k = P_k(-)H(\hat{x}_k(-))(H(\hat{x}_k(-))P_k(-)H(\hat{x}_k(-))^T + R_k)^{-1}, \quad (5)$$

где \hat{x}_k – оцениваемый вектор неизвестных;

P_k – ковариационная матрица на эпоху k ;

(-) и (+) – индикаторы шага до и после работы фильтра;

$h(x)$ – вектор модели измерений;

$H(x)$ – матрица частных производных;

R_k – ковариационная матрица ошибок измерений.

Предложенный подход позволяет обойти один из основных недостатков метода PPP – продолжительный период сходимости решения. Использование в методике КП координат и дисперсий, в контексте метода Байеса, позволяет сократить

время и повысить точность определения постоянных параметров (неоднозначности фазовых измерений) и медленно меняющихся параметров (зенитная тропосферная задержка), что приводит к улучшению обусловленности задачи определения координат пользователя.

На основании выполненного исследования разработан алгоритм применения поправок из решения уравнений двойных разностей в методике КП и критерий их активации (рисунок 1).

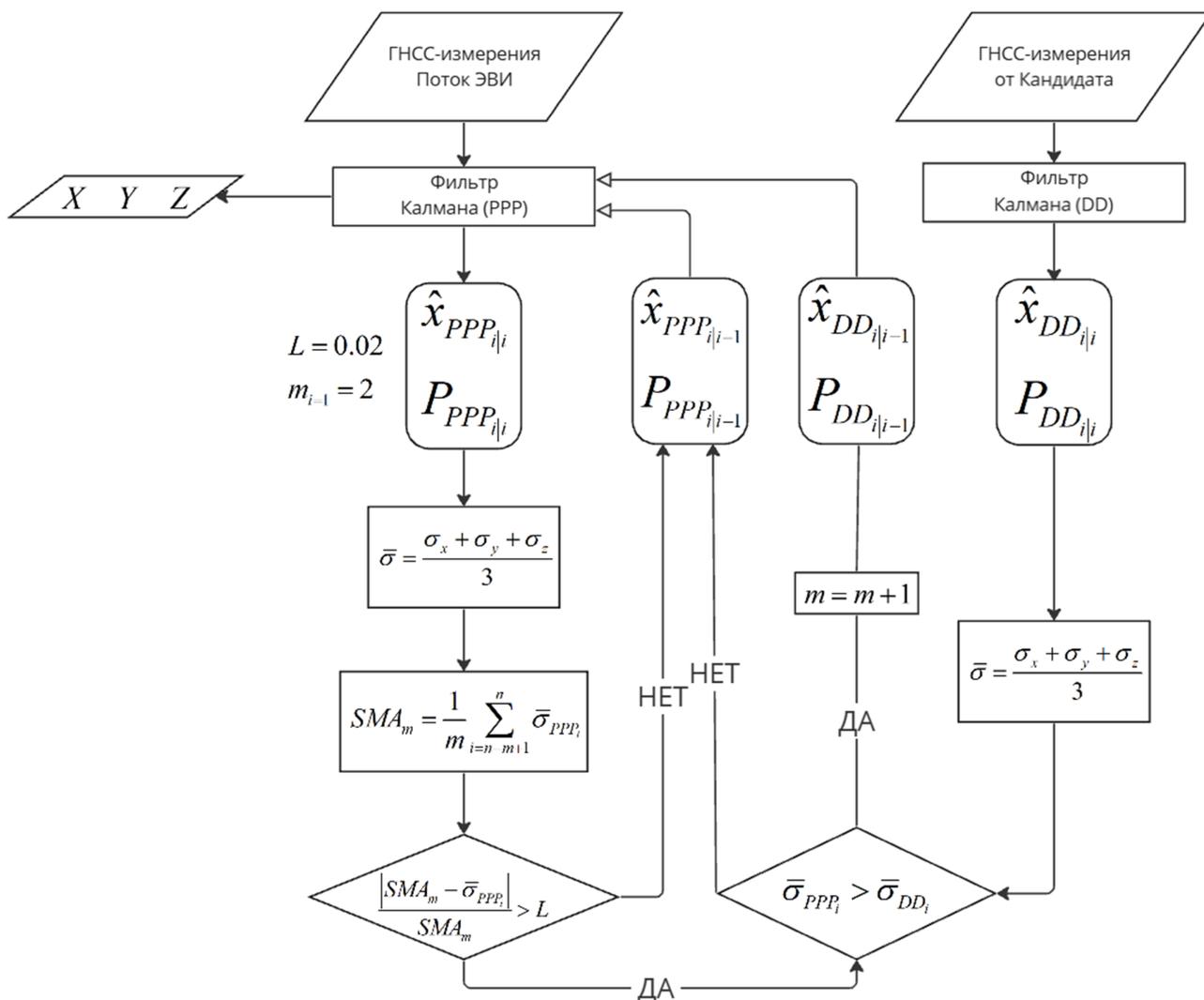


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма активации коррекции в КП

Обосновано применение нового подхода к распределению статусов (ролей) в рамках реализации методики КП: наряду со статусами «Базовая станция» и «Мобильная станция» вводится статус «Кандидат».

Статус «Мобильная станция» приобретает станцией в начальный момент реализации методики КП, а также в случае снижения точности оценки координат на станции до некоторого порогового значения. При этом посылается запрос в облачный центр обработки данных (ОЦОД), включающий приближённые координаты станции, и ожидается ответ с данными о подключении другой станции, выступающей в роли базовой, для выполнения оптимизации решения методикой КП. После получения достаточно точного решения мобильная станция разрывает интернет-соединение с базовой станцией, переходя в режим PPP. Предполагается, что большую часть времени мобильные станции будут выполнять позиционирование именно в режиме PPP, что позволит снизить нагрузку на каналы связи.

Статус «Кандидат» приобретает станцией в том случае, если ее координаты определены с СКО менее некоторого порогового значения (в целях тестирования выбрано 20 см), при условии, что пользователь станции дал согласие на передачу своих высокоточных координат другим пользователям системы.

Статус «базовая станция» может назначаться ОЦОД по мере необходимости станции-кандидату в том случае, если вблизи нее находятся мобильные станции, которым требуется корректирующая информация. Базовая станция передает поток данных измерений и высокоточных координат в формате RTCM на мобильную станцию через главный сервер.

Третий раздел диссертации посвящен экспериментальному исследованию, целью которого являлась проверка состоятельности предлагаемой методики КП. Были проведены псевдокинематические (с оцениванием координат неподвижных

объектов в кинематическом режиме обработки данных в реальном времени) и кинематические эксперименты.

Эксперименты заключались в сравнении СКО оценок координат, полученных синхронно в режиме реального времени по методике КП, методами PPP и RTK.

В качестве исходных данных для проведения экспериментов были использованы:

– эталонные координаты НИП в ITRF2020, на момент наблюдений, а также эталонный трек мобильной станции;

– поток ЭВИ: эфемерид, поправок БШВ навигационных космических аппаратов и ДКЗ сервиса реального времени МГС, для созвездий GPS, ГЛОНАСС и Galileo;

– поток измерений с НИП в формате RTCM;

– параметры модели фазовых центров антенн НКА и НИП IGSR3_2077.

Также в ходе разработки методики КП и подготовки экспериментов потребовалась и была выполнена модификация СЛАУ метода PPP для применения дифференциальных кодовых задержек в реальном времени из потока поправок ПСС для систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo в открытом исходном коде на основе программной библиотеки RTKLIV для обработки ГНСС-измерений в режиме реального времени, позволяющая значительно сократить время сходимости решения по многосистемным ГНСС-измерениям.

В псевдокинематических экспериментах в роли мобильной станции выступали контрольные станции с известными координатами ITRF2020, приведенные к текущей эпохе. Контрольные станции располагались на разных удалениях от станций, выступающих в статусах «Кандидат» и «Базовая станция», местоположение которых также оценивалось в рамках методики КП. Контрольные станции находились на расстояниях от базовых станций в 74, 125, 320 и 550 км. Такие расстояния вы-

браны с целью демонстрации эффективности, предлагаемой методики КП, в сравнении с методом РТК, эффективность которого напрямую зависит от расстояния между мобильной станцией и базовой станцией. В течение недельной измерительной кампании было получено 42 временных ряда оценок координат мобильной станции для каждой пары «Мобильная – Базовая станция» каждым из методов. Временные ряды имели продолжительность 4 ч с интервалом записи координат 1 с. Затем были вычислены временные ряды отклонений оценок координат от эталона и представлены в проекциях на оси горизонтальной топоцентрической системы координат каждого НИП в направлениях: на север (N), на восток (E), вверх по нормали к эллипсоиду GRS80 (U). Каждой станции соответствует три типа решения, запись которых выполнялась синхронно в один момент времени, для методов PPP, РТК и методики КП в псевдокинематическом режиме. В таблице 1 приведены результаты СКО по каждой из координат, для каждого НИП, вычисленные по формуле Гаусса

$$m = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}}, \quad (6)$$

где n – количество измерений;

Δ^2 – разница между эталонными координатами на эпоху наблюдений и вычисленными координатами.

Таблица 1 – Оценка точности определения координат методами PPP, RTK и методикой КП в псевдокинематическом режиме

Ме- тод	Пара станций, км											
	<i>BORJ-WSRT</i> , 74 км			<i>KARL-FFMJ</i> , 125 км			<i>WGTN-MQZG</i> , 320 км			<i>RDSD-CRO1</i> , 550 км		
	Е, м	N, м	U, м	Е, м	N, м	U, м	Е, м	N, м	U, м	Е, м	N, м	U, м
КП	0,12	0,09	0,29	0,12	0,10	0,20	0,17	0,14	0,30	0,17	0,17	0,37
PPP	0,20	0,22	0,51	0,19	0,14	0,38	0,16	0,15	0,45	0,18	0,20	0,64
RTK	0,09	0,07	0,15	0,19	0,16	0,26	0,51	0,40	0,78	2,48	1,40	3,90

В кинематических экспериментах определялись отклонения оценок координат рабочей антенны ровера от эталонного трека, полученного по результатам постобработки ГНСС-измерений с геодезического приемника Stonex S800A относительно методом от пункта ФАГС NSK1, координаты которого были определены на момент выполнения эксперимента в ITRF2020.

Результат оценки точности в кинематическом эксперименте относительно эталонного трека представлен в таблице 2. Величины СКО по всем типам решения включают нескорректированное смещение на 15,7 см в горизонтальной плоскости между фазовыми центрами рабочей антенны ровера и антенны, использованной для получения эталонного решения.

В процессе исследования было доказано, что реализация методики КП при продолжительности ГНСС-измерений уменьшает оценки СКО в сравнении с методом PPP.

Таблица 2 – Оценка точности определения координат методами PPP, RTK и методикой КП в кинематическом режиме

Тип оценки точности	Методы		
	<i>Коллаборативное позиционирование</i>	<i>PPP</i>	<i>RTK</i>
СКО (68,27 %)	<i>E: 0,40</i> <i>N: 0,56</i> <i>U: 1,03</i>	E: 0,88 N: 1,35 U: 1,39	E: 0,39 N: 0,60 U: 3,16

Чем дальше базовая станция находится от мобильной, тем заметнее становится преимущество методики КП в сравнении с методом RTK, которое выражается в меньших значениях СКО при одинаковых расстояниях. На расстоянии в 74 км, согласно полученной оценке точности из таблицы 1, методика КП превзошла RTK по обеспечению точности определения плановых координат, но уступила по точности определения высоты. Однако для расстояний в диапазоне 300–500 км, для которых применение метода RTK является нецелесообразным, применение КП позволило уменьшить погрешность на 2,31 м (в 14 раз) по координате E, на 1,23 см (в 8 раз) по координате N и на 3,53 м (в 10 раз) по координате U, на примере пункта RDSD. При этом СКО меньше, чем для метода PPP.

Доказано, что в процессе реализации методики достигается эффект сокращения времени сходимости решения до уровня СКО 20 см по каждой из координат в кинематическом режиме. В результате время сходимости составляет от 7 до 60 секунд для КП в сравнении с временем от 20 до 80 минут для PPP.

Положительный эффект реализации методики КП заключается в уменьшении СКО, соответственно повышении точности определения местоположения. Также применение методики КП обеспечивает время сходимости решения на

уровне RTK, до первой минуты, а при потере сигнала на станции решение сходится в течение нескольких секунд. Данный результат был получен при реализации алгоритма, описанного во втором разделе, который позволяет оптимизировать решение за счет инициализации фильтра Калмана, решением из относительного метода в режиме реального времени с ПБС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационного исследования были решены поставленные задачи и получены следующие основные результаты:

– проанализированы исследования и теоретически обоснована необходимость в методике коллаборативного позиционирования объектов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем;

– разработана методика коллаборативного позиционирования объектов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем на основе предложенного в ходе исследования алгоритма управления фильтром Калмана для метода PPP;

– модифицирована система линейных алгебраических уравнений метода PPP для учета дифференциальных кодовых задержек в режиме реального времени из потока поправок ПСС для систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo в свободном программном обеспечении RTKLIB;

– обеспечено соответствие методики КП перспективным требованиям потребителей высокоточной навигации в режиме реального времени: определение СКО по внутренней сходимости координат в кинематическом режиме не более 20 см и не более 10 см для статического режима; время, необходимое на получение координат с указанными СКО, не более 2 минут; время, необходимое для

восстановления указанного уровня СКО после прерывания приема сигналов ГНСС, не более 5 с; глобальность и непрерывность высокоточного навигационного поля; минимальный объем данных, передаваемых по телекоммуникационным сетям;

– экспериментальная оценка эффективности сервиса коллаборативного позиционирования и методики в сравнении с классическими методами и подходами.

Таким образом, поставленная цель – разработка методики коллаборативного позиционирования объектов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем, соответствующего современным и перспективным требованиям потребителей, – достигнута.

Представленная в диссертационном исследовании методика коллаборативного позиционирования объектов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем рекомендуется к использованию при определении координат с помощью ГНСС для обеспечения оперативности и стабильности позиционирования в режиме реального времени.

Перспектива дальнейших исследований заключается в развитии метода PPP в рамках методики коллаборативного позиционирования, посредством использования дифференциальных фазовых задержек в реальном времени, согласно модели некалиброванных фазовых задержек для разрешения фазовых неоднозначностей в методе PPP.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ
ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Долин, С. В. Влияние ротационного постэффекта на разрядку в коровом слое / С. В. Долин, В. Ф. Канушин – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т 26, № 1. – С 16–24. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-1-16-24.

2 Долин, С. В. Исследование возможности высокоточного позиционирования с использованием смартфонов нового поколения / С. В. Долин, А. В. Мареев, Л. М. Михаханова // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28, № 6. – С. 28–34. – Текст : непосредственный.

3 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616315 Российская Федерация. Integral Zone Seismic : № 2020613337 : заявл. 23.03.2020 : опубл. 15.06.2020 / С. В. Долин, В. Ф. Канушин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий».

4 Долин, С. В. Учет дифференциальных кодовых задержек многосистемных ГНСС-измерений при позиционировании в режиме реального времени методом Precise Point Positioning / С. В. Долин. – Текст : непосредственный // Гироскопия и навигация. – 2022. – Т. 30. – № 4 (119). – С. 142–151. – DOI 10.17285/0869-7035.00108.

5 Жданова, П. В. Оценка точности двухчастотных ГНСС-измерений со смартфона Xiaomi Mi8 / П. В. Жданова, С. В. Долин – Текст : непосредственный // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения, 23–25 ноября 2022 г., Новосибирск. В 3 ч. Ч. 1. – Новосибирск : СГУГиТ, 2023. – С. 190–196. – DOI 10.33764/2687-041X-2023-1-190-196.

6 Shevchuk, S. Automatization for geodetic support of 3D transient electomagnetic survey / S. Shevchuk, S. Dolin, V. Kastornykh. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIX Международный научный конгресс, 17–19 мая 2023 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2023. – С. 242–249. – DOI 10.33764/2618-981X-2023-1-2-242-249.