

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

На правах рукописи

Долин Сергей Владимирович



Разработка методики коллаборативного позиционирования объектов
по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем

1.6.22. Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук
Липатников Леонид Алексеевич

Новосибирск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ВЫСОКОТОЧНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ	14
1.1 Общие сведения.....	14
1.2 Основные принципы обработки ГНСС-измерений в реальном времени.....	18
1.3 Метод Precise Point Positioning	27
1.4 Метод Precise Point Positioning с разрешением неоднозначности	36
1.4.1 Метод PPP-RTK.....	36
1.4.2 Метод PPP-AR	38
1.5 Метод относительного позиционирования	45
1.5.1 Real-Time Kinematic для короткой базовой линии	45
1.5.2 Real-Time Kinematic для длинной базовой линии	47
1.5.3 Режим подвижной базовой линии Moving-Baseline	48
1.6 Метод сетевого RTK (N-RTK)	48
1.7 Спутниковые функциональные дополнения космического базирования.....	55
2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОЛЛАБОРАТИВНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ.....	58
2.1 Принцип и схема методики.....	58
2.2 Модификация системы линейных алгебраических уравнений для учета дифференциальных кодовых задержек в многосистемных ГНСС-измерениях в методе PPP.....	61
2.3 Реализация методики коллаборативного позиционирования объектов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем.....	65

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ КОЛЛАБОРАТИВНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПО СИГНАЛАМ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ	74
3.1 Постановка экспериментов	74
3.2 Эксперимент по оценке точности и времени сходимости решения в методе PPP с учетом ДКЗ в реальном времени	74
3.3 Псевдокинематические эксперименты	86
3.4 Кинематические эксперименты	90
3.5 Псевдокинематические испытания с подвижной базовой станцией	94
3.6 Выводы по методике коллаборативного позиционирования	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	98
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	100
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	101

ВВЕДЕНИЕ

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 беспроводного 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 вы-

сокоточному 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: Abdel-salam 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 концепцию 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 нави-

гационных 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 высокоточного 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 RTK) 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; со-

кращение времени инициализации высокоточного решения до значений, характерных для метода RTK.

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 RTK;

б) модификация системы линейных алгебраических уравнений метода PPP для применения дифференциальных кодовых задержек в реальном времени из потока 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 RTKLIB 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 псевдокинематических 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.

1 ВЫСОКОТОЧНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

1.1 Общие сведения

Методы высокоточного определения координат с применением технологий глобальных навигационных спутниковых систем в режиме реального времени можно разделить на два вида исполнения – в пространстве состояния системы (state-space representation – SSR) (ПСС) и в представлении пространства наблюдений (измерений) (observation space representation – OSR) (ППН). Наиболее распространенным способом передачи корректирующей информации в режиме реального времени является передача данных согласно протоколу сетевой транспортировки RTCM через интернет (англ. – Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) (NTRIP-кастер). Примерами методов ГНСС, реализующих данные представления, являются дифференциальные методы PPP и PPP-RTK для ПСС, для ППН SBAS и сетевые реализации RTK [58] (виртуальные базовые станции: Virtual Reference Station (VRS); псевдобазовые станции: Pseudo Reference Station (PRS); площадные корректирующие параметры: Area Correction Parameters (Flächen Korrektur Parameter – FKP); концепция опорных и вспомогательных базовых станций: Master and Auxiliary Reference Stations (Master-Auxiliary Concept – MAC); индивидуализированная концепция опорных и вспомогательных станций: Individualized Master-Auxiliary Concept (iMAC)).

В плане представления поправок лучшим способом передачи считается ПСС, так как в этой реализации интерполяция физических параметров возможна с использованием различных математических моделей и стохастических свойств оцениваемых параметров. Для ППН же интерполяцию необходимо выполнять для общей суммы всех

эффектов, что не позволяет учитывать специфику оцениваемых величин. В работе [97] авторами представлено сравнение различных методов по репрезентативности технических особенностей, из которого очевидно, что применение ПСС лучше всего подходит для неограниченного числа статических или кинематических решений и для неограниченной зоны обслуживания, охватываемой опорными станциями.

Основным поставщиком корректирующей информации в пространстве состояний системы является международная ГНСС-служба (МГС) (англ. International GNSS service – IGS). Группа по поддержанию и развитию службы реального времени (англ. Real-Time Service – RTS) МГС обеспечивает доступ к высокоточной эфемеридно-временной информации (ЭВИ): эфемериды, поправки бортовых шкал времени (БШВ) навигационных космических аппаратов, кодовым и фазовым дифференциальным задержкам, позволяя выполнять позиционирование в реальном времени методом PPP в мировом масштабе. Служба реального времени МГС основана на глобальной инфраструктуре сетевых станций, центров обработки данных и аналитических центров, которые предоставляют высокоточные оценки корректирующих ГНСС-данных в мировом масштабе. Координатором центра анализа службы реального времени является Федеральное агентство картографии и геодезии (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie – BKG) – это техническое агентство при Федеральном министерстве внутренних дел и по делам общественности Германии. Также BKG оценивает и транслирует собственные поправки для многосистемных ГНСС-измерений SSRA00BKG1.

К основным 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) – дифференциальный метод позиционирования, реализуемый посредством ионосферно-свободной линейной комбинации и приема поправок в пространстве состояния системы в режиме реального времени;

– Real Time Kinematic (RTK) – реализация относительного метода для определения коротких и длинных базовых линий, в режиме реального времени;

– Network Real Time Kinematic (NRTK) – дифференциальный метод позиционирования в режиме реального времени на основе передачи поправок от сетей ПДБС;

– PPP-RTK – метод PPP с разрешением неоднозначностей, основанный на передаче оценок дифференциальных фазовых смещений от региональных сетей ПДБС.

Каждый из методов имеет ряд особенностей по реализации высокоточного позиционирования, которые в совокупности не позволяют решать задачи новых и потенциальных пользователей [23, 24], а именно:

– 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.

Отсутствие возможности реализации высокоточного позиционирования посредством существующих методов ГНСС связано с ограниченной областью действия, как в случае с региональными сетями ПДБС или же продолжительным временем сходимости с невозможностью разрешения фазовых неоднозначностей, как в PPP. На рисунке 1 представлена схема эффективности методов спутникового позиционирования

как по уровню точности, так и по радиусу действия. Все эти факторы не позволяют в полной мере реализовать глобальное высокоточное позиционирование в режиме реального времени.

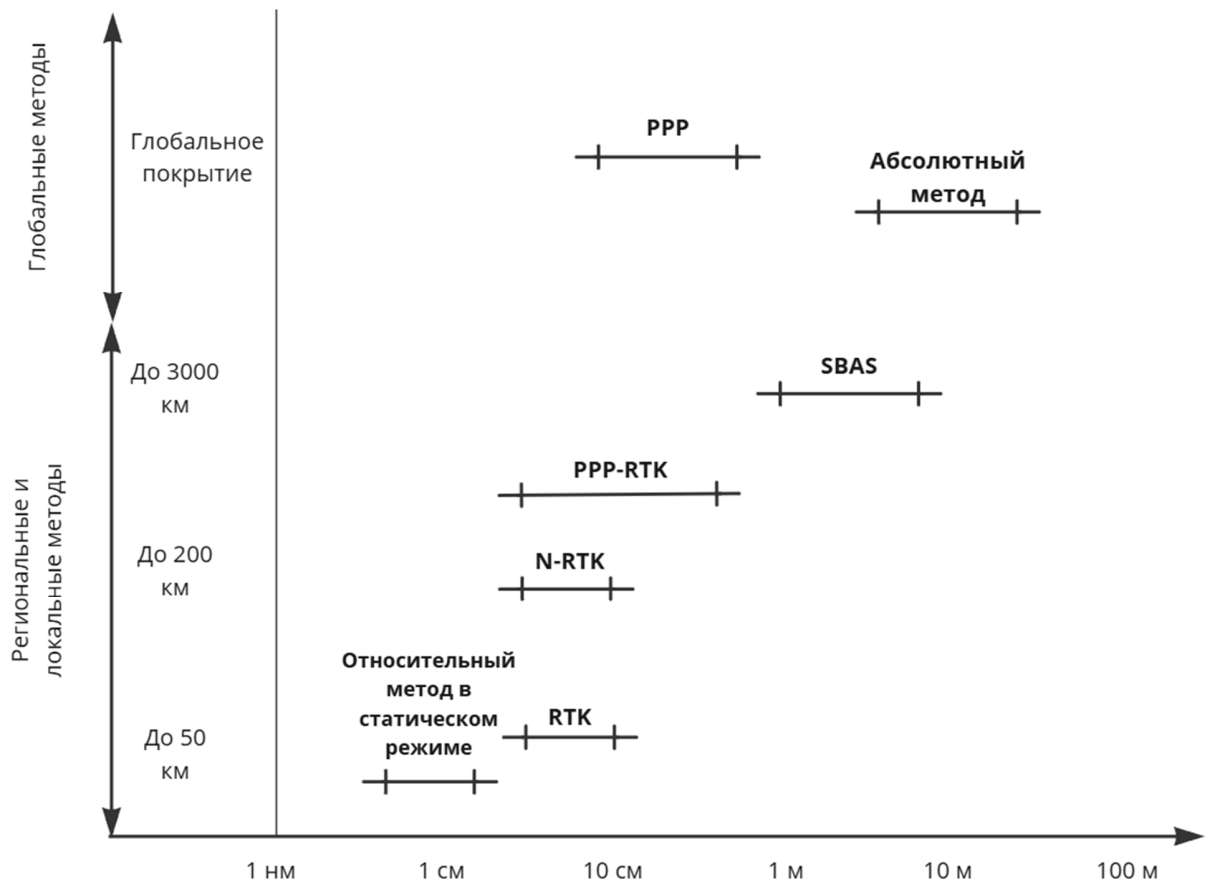


Рисунок 1 – Сравнение ГНСС-методов

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 высокоточного позиционирования и методик по повышению эффективности методов 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. и др. Значительный вклад в создание и развитие методов PPP и PPP-RTK внесли следующие зарубежные авторы: Abdel-salam 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.

1.2 Основные принципы обработки ГНСС-измерений в реальном времени

В большинстве решаемых с помощью ГНСС задач наибольший интерес представляют параметры, изменяющиеся во времени. Примером такой задачи является определение координат движущейся платформы или автомобиля. При определениях деформаций земной поверхности, зданий и сооружений с помощью ГНСС также приходится иметь дело с параметрами, изменяющимися во времени. В таких задачах при обработке ГНСС-измерений в реальном времени используются рекурсивные методы, такие как фильтр Калмана [81, 26, 39, 81, 47, 35] или специальные реализации метода наименьших квадратов [84, 18, 55, 82, 79, 80]. При рекурсивном методе обработки ГНСС-измерений вектор оцениваемых параметров не детерминирован и чаще его называют вектором состояния системы. К модели измерений добавляется динамическая модель, описывающая изменение вектора состояния во времени. Связь в модели

измерений между вектором измерений $\mathbf{y}_k \in \mathbb{R}^{m_k}$ и вектором состояния модели $\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^n$ представлена следующим уравнением:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{n}_k, k = 0, \dots, \quad (1)$$

при $E(\mathbf{x}_0) = \bar{\mathbf{x}}_0$;

$$E(\mathbf{n}_k) = 0;$$

$$C(\mathbf{x}_0, \mathbf{n}_k) = 0;$$

$$C(\mathbf{x}_0, \mathbf{n}_k) = \mathbf{R}_k \delta_{k,l},$$

где $C(.,.)$ – ковариационная матрица между двумя векторами;

\mathbf{R}_k – ковариационная матрица шума измерений;

\mathbf{n}_k – шум измерений с нулевым средним;

$\delta_{k,l}$ – дельта Кронекера.

Линейную динамическую модель системы эволюции вектора состояния \mathbf{x}_k представляют как

$$\mathbf{x}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{d}_k, k = 1, \dots, \quad (2)$$

при $E(\mathbf{d}_k) = 0$;

$$C(\mathbf{x}_0, \mathbf{d}_k) = 0;$$

$$C(\mathbf{d}_k, \mathbf{n}_l) = 0;$$

$$C(\mathbf{d}_k, \mathbf{d}_l) = \mathbf{S}_k \delta_{k,l},$$

где $\Phi_{k,k-1}$ – матрица перехода;

\mathbf{S}_k – ковариационная матрица системного шума $\mathbf{d}_k \in \mathbb{R}^n$;

\mathbf{d}_k – системный шума с нулевым средним.

Если предполагается, что среднее значение начального состояния $E(\mathbf{x}_0)$ неизвестно, то его необходимо оценить. Если начальный вектор состояния $\hat{\mathbf{x}}_{0|0}$ и ковариационная матрица $\mathbf{P}_{0|0}$ известны, то алгоритм рекурсии начинается с этапа инициализации этих начальных значений, после чего рекурсивная процедура будет состоять из двух этапов для каждой эпохи: обновления времени (ОВ) и обновления измерений (ОИ).

Одним из основных математических методов оценки вектора неизвестных является метод наименьших квадратов (МНК), однако классическая линейризованная версия этого метода дает оценку вектора неизвестных с минимальным квадратом ошибки измерений при условии, когда известны все измерения и считается, что вектор неизвестных (или состояния) детерминирован и не изменяется во времени:

$$E \begin{pmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_k \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{A}_k \end{bmatrix} \mathbf{x} \quad (3)$$

с ковариационной матрицей $\mathbf{Q}_{yy} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1 & & & 0 \\ & \mathbf{Q}_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \mathbf{Q}_k \end{bmatrix}$,

где \mathbf{y}_i – вектор измерений, соответствующий эпохе $i = 1, \dots, k$.

Вектор неизвестных \mathbf{x} оценивается с помощью алгоритма наилучшей линейной несмещенной оценки по всем эпохам k как:

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k)} = \left(\sum_{i=1}^k \mathbf{A}_i^T \mathbf{Q}_i^{-1} \mathbf{A}_i \right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^k \mathbf{A}_i^T \mathbf{Q}_i^{-1} \mathbf{y}_i \right). \quad (4)$$

Существуют специальные рекурсивные реализации метода наименьших квадратов (РМНК), где для каждой новой эпохи измерений оценивается новое решение, основанное на оценке всех предыдущих эпох. В таком случае начальная эпоха модели измерений (инициализация) будет задана следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{(1)} &= \left(\mathbf{A}_1^T \mathbf{Q}_1^{-1} \mathbf{A}_1 \right)^{-1} \mathbf{A}_1^T \mathbf{Q}_1^{-1} \mathbf{y}_1, \\ \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_{(1)}} &= \left(\mathbf{A}_1^T \mathbf{Q}_1^{-1} \mathbf{A}_1 \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

После этапа инициализации возможно выполнять оценивание неизвестных параметров для каждой эпохи $k = 2, 3, \dots$ в виде:

$$E \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)} \\ \mathbf{y}_k \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{A}_k \end{bmatrix} \mathbf{x}; \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}} \\ \mathbf{Q}_k \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k)} = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_{(k)}} \left(\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}}^{-1} \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)} + \mathbf{A}_k^T \mathbf{Q}_k^{-1} \mathbf{y}_k \right), \quad (7)$$

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_{(k)}} = \left(\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}}^{-1} + \mathbf{A}_k^T \mathbf{Q}_k^{-1} \mathbf{A}_k \right)^{-1}, \quad (8)$$

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}}^{-1} = \sum_{i=1}^{k-1} \mathbf{A}_i^T \mathbf{Q}_i^{-1} \mathbf{A}_i, \quad (9)$$

тогда, используя алгоритм наилучшей линейной несмещенной оценки, можно записать уравнение для оценки параметров вектора состояния как:

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k)} = \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)} + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}), k > 1, \quad (10)$$

где матрица усиления

$$\mathbf{K}_k = \left(\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}}^{-1} + \mathbf{A}_k^T \mathbf{Q}_k^{-1} \mathbf{A}_k \right)^{-1} \mathbf{A}_k^T \mathbf{Q}_k^{-1}. \quad (11)$$

Выражение (10) в данном случае называют этапом ОИ, поскольку правая часть этого уравнения содержит оценку, основанную на всех предыдущих эпохах, $\hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}$, к тому же в этом уравнении есть запись: $\mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)})$, в котором $\mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}$ может быть интерпретировано как прогнозирование вектора измерений \mathbf{y}_k . Из этого следует, что вектор прогнозируемых остаточных невязок будет вычислен согласно разности $\mathbf{v}_k = \mathbf{y}_k - \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}$. В данном случае матрица \mathbf{K}_k называется матрицей усиления, поскольку усиление, получаемое с помощью новых измерений \mathbf{y}_k , определяется величиной $\mathbf{K}_k \mathbf{v}_k$.

Вышеописанный алгоритм оценивания посредством РМНК может использоваться в задачах по оценке вектора неизвестных в реальном времени при статическом режиме обработки ГНСС-измерений.

Задачу по определению координат на физической поверхности посредством ГНСС-измерений в кинематическом режиме, можно назвать задачей по определению состояния динамической системы (ДС). Одним из основных методов рекурсивной оценки состояния ДС в режиме реального времени, является фильтр Калмана. Фильтр

Калмана – это рекурсивный метод обработки измерений, позволяющий получить оценку параметров и минимизировать среднеквадратическую ошибку на основе неполных, неопределенных и зашумленных измерений, при условии, что все шумы измерений являются Гауссовскими или белыми.

Для получения оценок вектора состояния необходимо представить модель процесса в соответствии со структурой фильтра в виде матричного уравнения, где для каждого момента времени k работы фильтра необходимо определить матрицу состояния системы \mathbf{A}_k , матрицу измерений \mathbf{H}_k , ковариационную матрицу оцениваемых параметров \mathbf{P}_k , ковариационную матрицу шума измерений \mathbf{R}_k и при наличии управляющих воздействий матрицу их коэффициентов \mathbf{B}_k и вектор управления \mathbf{u}_k .

После инициализации фильтра Калмана выполняется двухэтапная процедура обновления по времени и измерениям. При ОВ информация о ДС используется для прогнозирования вектора состояния системы $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ и ее ковариационной матрицы $\mathbf{P}_{k|k-1}$. На этапе ОИ новые измерения в векторе \mathbf{y}_k объединяются согласно принципу прогнозирования с минимальной среднеквадратической ошибкой (МСО) [18, 22, 88, 93], выполняется прогноз вектора состояния системы $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ и ее ковариационной матрицы $\mathbf{P}_{k|k}$ на основе предыдущей оценки (рисунок 2).

На практике при выполнении обработки ГНСС-измерений приходится иметь дело с нелинейными уравнениями измерений, в связи с этим принято использовать расширенный фильтр Калмана (extended Kalman filter – ЕKF) (РФК), который можно применить к линеаризованной версии уравнений измерений с потерей оптимальности. В обработке спутниковых ГНСС-измерений в режиме реального времени РФК считается стандартом де-факто [94, 44, 79].

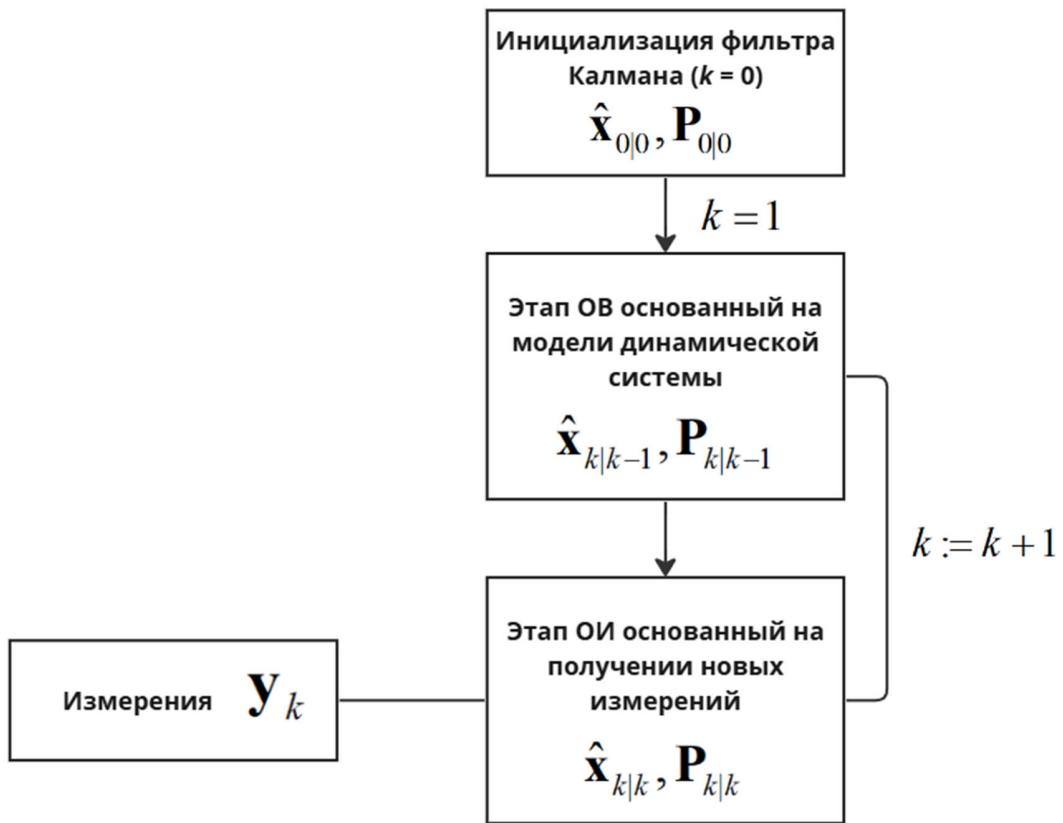


Рисунок 2 – Рекурсия фильтра Калмана с этапами обновления времени и измерений

В РФК модели состояний и измерений могут быть дифференцируемыми функциями, а не линейными:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{A}_k(\mathbf{x}_k) + \mathbf{n}_k, \quad (12)$$

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{\Phi}_k(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{e}_k, \quad (13)$$

где \mathbf{n}_k и \mathbf{e}_k – это Гауссовский шум измерений и процесса с нулевым средним и ковариационными матрицами \mathbf{P}_k и \mathbf{R}_k соответственно;

$\mathbf{\Phi}_k(\bullet)$ – матрица перехода.

Тогда этап обновления времени в РФК можно представить как:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \Phi_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}), \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{J}_{\Phi_k} \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{J}_{\Phi_k}^T + \mathbf{S}_k, \quad (15)$$

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k, \quad (16)$$

и этап обновления измерений

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{A}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})), \quad (17)$$

$$\mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I}_n - \mathbf{K}_k \mathbf{J}_{\mathbf{A}_k}) \mathbf{P}_{k|k-1}, \quad (18)$$

с матрицей усиления

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{J}_{\mathbf{A}_k}^T (\mathbf{R}_k + \mathbf{J}_{\mathbf{A}_k} \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{J}_{\mathbf{A}_k}^T)^{-1}, \quad (19)$$

где \mathbf{J}_{Φ_k} и $\mathbf{J}_{\mathbf{A}_k}$ – матрица Якоби (Якобиан), вычисленная при $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ для матрицы \mathbf{A}_k и при $\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$ для матрицы Φ_k .

Параллельно с фильтрацией измерений РФК в реальном времени может использоваться сглаживающий фильтр для получения более точной оценки состояний ДС. Один из таких сглаживающих фильтров – это фильтр с фиксированной точкой, кото-

рый оценивает состояние в фиксированный момент времени t_k , и эта оценка состояния обновляется по мере того, как становится доступным все больше и больше измерений (рисунок 3).

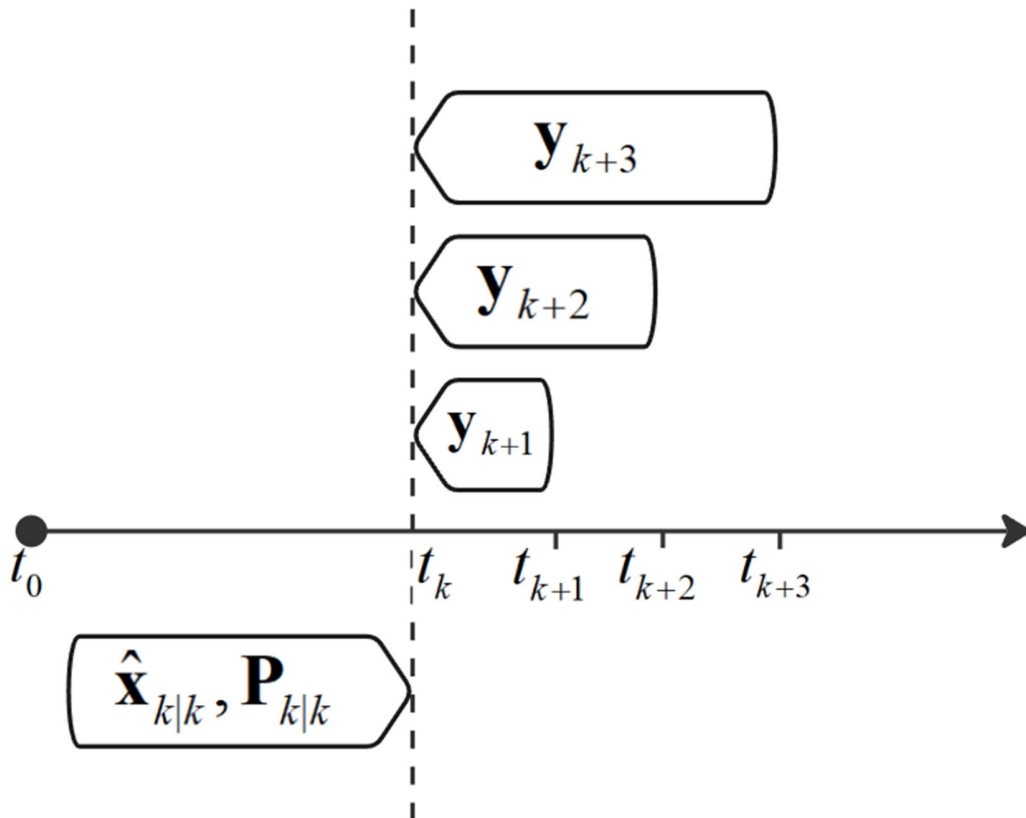


Рисунок 3 – Алгоритм сглаживания с фиксированной точкой для оценки вектора состояния в фиксированный момент времени t_k с увеличением коэффициента сглаживания по мере увеличения количества измерений

При использовании фильтра сглаживания с фиксированной точкой оценка состояния ДС для одного конкретного момента t_k непрерывно сглаживается по мере поступления новых измерений. Временной интервал, используемый для оценки сглаженного состояния, становится намного длиннее. Сглаживающий фильтр с фиксированной точкой можно выразить согласно нижеприведенным уравнениям, где верхний

индекс s указывает на сглаженное состояние. Оценки вектора состояния и ковариационные матрицы без верхнего индекса относятся к стандартным решениям РФК. В качестве исходных значений используется решение из РФК:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|j}^s = \hat{\mathbf{x}}_{k|j-1}^s \mathbf{M}_j (\hat{\mathbf{x}}_{j|j} - \hat{\mathbf{x}}_{j|j-1}), \quad (20)$$

$$\mathbf{P}_{k|j}^s = \mathbf{P}_{k|j-1}^s + \mathbf{M}_j (\mathbf{P}_{j|j} - \mathbf{P}_{j|j-1}) \mathbf{M}_j^T, \quad (21)$$

$$\mathbf{M}_j = \prod_{i=k}^{j-1} \mathbf{P}_{i|i} \Phi_{i+1|i}^T \mathbf{P}_{i+1|i}^{-1}. \quad (22)$$

При этом k зафиксировано, а $j = k + 1, k + 2, \dots$. Сглаживание оценок вектора состояния может использоваться при статическом режиме обработки ГНСС-измерений, что позволяет получить более точную оценку на текущий момент времени, по мере увеличения измерений. Для кинематического режима обработки ГНСС-измерений используется только фильтр Калмана.

1.3 Метод Precise Point Positioning

Precise Point Positioning (PPP) [8, 78, 80, 89, 64, 28, 36] – это метод, реализуемый на основе решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) ионосферно-свободной линейной комбинации (ИСЛК). Для реализации высокоточного позиционирования методом PPP необходима априорная высокоточная информация об орбитах и поправках часов, которые должны соответствовать одним и тем же международным стандартам, таким как действующие конвенции Международной службы вращения

Земли и систем отсчета (International Earth Rotation Service – IERS) [40, 41, 5, 10, 48]. Поскольку в методе PPP используются наблюдения фазы несущей, алгоритм определения параметров позиционирования должен оценивать неопределенности начальной фазы для всех спутников, а также положение станции, сдвиги часов станции и задержки на пути в тропосфере и зените.

Для реализации метода PPP, в большинстве случаев, необходима двухчастотная аппаратура, так как в методе используют ИСЛК фазовых и кодовых псевдодальностей, связанных с положением пользователя, поправками часов, поправкой за влияние тропосферы и параметрами неоднозначности. Исходная модель ГНСС-измерений для одной системы GPS в методе PPP, предложенная в 1997 г. [103] и применяемая до сих пор во многих программных продуктах, на основе ИСЛК представлена в уравнениях:

$$P_{r,IF}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + \epsilon_{P_{IF}}^s, \quad (23)$$

$$L_{r,IF}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + \lambda_{IF} A_{IF} + \lambda_{IF} \Phi_{pw}^s + \epsilon_{\Phi_{IF}}^s, \quad (24)$$

где s – номер спутника;

$P_{r,IF}^s$ и $L_{r,IF}^s$ – ИСЛК кодовых и фазовых измерений, которые определяются

$$\text{как } P_{r,IF}^s = C_i P_{r_i}^s + C_j P_{r_j}^s, L_{r,IF}^s = C_i L_{r_i}^s + C_j L_{r_j}^s, C_i = \frac{f_i^2}{f_i^2 - f_j^2} \text{ и } C_j = \frac{-f_j^2}{f_i^2 - f_j^2};$$

ρ_r^s – геометрическая дальность $\|\mathbf{x}^s - \mathbf{x}_r\|$ между положением фазового центра антенны спутника $\mathbf{x}^s = (x^s, y^s, z^s)^T$ в момент отправки сигнала на эпоху t_E и положением

фазового центра антенны приемника $\mathbf{x}_r = (x_r, y_r, z_r)^T$ в момент приема сигнала на эпоху $t_A \cong t_E + \frac{\rho_r^s}{c}$ в общеземной геоцентрической прямоугольной системе координат на момент t_A ;

c – скорость света в вакууме;

dt_r и dt^s – смещения часов на приемнике и спутнике относительно системной шкалы времени GPS;

T_r^s – ошибка ИСЛК, связанная с тропосферной задержкой;

λ_{IF} – длина волны ИСЛК несущей сигналов на частотах f_i, f_j ;

A_{IF} – нецелочисленная неоднозначность ИСЛК фаз несущей (ИСЛК целочисленных неоднозначностей фаз на частотах f_i, f_j и нецелочисленных начальных значений фазы);

φ_{pw}^s – набег фазы несущей;

$\epsilon_{P_{IF}}^s$ и $\epsilon_{L_{IF}}^s$ – составляющие шума измерений.

Поскольку глобальные параметры ЭВИ ГНСС остаются фиксированными, координаты спутника $\mathbf{x}^s = (x^s, y^s, z^s)^T$ и спутниковые часы dt^s в (23), (24) считаются известными. Кроме того, неизвестная влажная часть тропосферной задержки обычно выражается как произведение влажной тропосферной задержки в зените (ВТЗ) (Zenit Tropospheric Delay – ZTD) и функции отображения, которая связывает наклонную влажную задержку с зенитной задержкой. В результате неизвестными параметрами модели PPP являются: координаты местоположения приемника $\mathbf{x}^s = (x^s, y^s, z^s)^T$, смещения часов на приемнике dt_r , влажная зенитная тропосферная задержка ZTD_w и нецелочисленная неоднозначность ИСЛК фаз несущей A_{IF} .

После фиксирования спутниковых часов и орбит приведенные выше уравнения наблюдений (23), (24) содержат измерения и неизвестные, относящиеся только к одной станции. В отличие от относительных или сетевых решений, использующих фазовые наблюдения двойных разностей фаз несущей, невозможно устранить отдельные целочисленные неоднозначности для двух сигналов i и j .

Стоит отметить, что PPP предоставляет оценки местоположения, ВТЗ и смещения часов на приемнике, которые согласуются с глобальной системой отсчета, подразумевающей определение неизвестных параметров по фиксированным глобальным оценкам ЭВИ.

Изначально в модели измерений PPP использовались пары сигналов GPS L1 и L2 ввиду наличия высокоточных оценок ЭВИ, совместимых с этими сигналами. Однако некоторые ГНСС, такие как Galileo или модернизированные НКА системы GPS, могут также обеспечивать наблюдения фазы несущей по сигналам E5 или L5 вместо наблюдений на частоте L2 или в дополнение к ней. Реализация двухчастотного PPP в общем случае справедлива для любой пары (достаточно разнесенных) частот сигналов f_i, f_j . Существуют также и реализации на основе трехчастотных наблюдений, которые также становятся возможными с использованием новых или модернизированных ГНСС [59, 64, 30, 51, 31].

Согласно исследованиям [89, 58, 78, 3, 8, 9], доказано, что метод PPP обеспечивает определение координат на сантиметровом уровне точности для режима статики и дециметрового уровня для режима кинематики с использованием двухчастотного ГНСС-приемника. Этот метод требует передачи потребителю многократно меньшего объема корректирующей информации в сравнении с RTK [97, 69]. Кроме того, в PPP корректирующая информация одинакова для всех пользователей, независимо от их местоположения. Это позволяет передавать корректирующую информацию по одно-

сторонним каналам связи, например, через телекоммуникационные спутники [27, 99, 100, 36, 17, 38]. Эта особенность делает PPP главным методом для реализации глобальных систем высокоточного позиционирования в режиме реального времени (GDPS, StarFire¹, C-NAV² и др.).

Реализация метода PPP подразумевает использование высокоточных моделей для расчета поправок и компенсации ряда возмущающих факторов. Можно разделить погрешности, учитываемые при выполнении позиционирования методом PPP, на три группы погрешностей, связанных со спутником, с траекторией распространения сигнала и с приемником. В таблицах 1–3 приведены соответствующие погрешности [102].

Таблица 1 – Систематические ошибки, связанные со спутником

Модели априорной коррекции PPP	Величина	СКО	Вид
Положение центра масс	-	1–2,5 см	Коррекция
Смещение часов	< 1 мс	50–75 пс, 1–2 см	Коррекция
Смещение фазового центра антенны (PCO)	0,5–3 м	10 см	Калибровка
Вариации фазового центра (PCV)	5–15 мм	0,2–1 мм	Калибровка
Релятивистские эффекты часов	10–20 м	-	Модель

¹ NavCom Technology, Inc. | Satellite-delivered Corrections and GNSS Receivers.

² C-Nav Positioning Solutions | Oceaneering.

Окончание таблицы 1

Модели априорной коррекции PPP	Величина	СКО	Вид
Дифференциальное смещение кода	до 15 нс, 1–3 м	0,1–1 нс	Модель/Коррекция
Дифференциальное смещение фазы	0,5 цикла	0,01 цикла	Коррекция

Таблица 2 – Систематические ошибки, связанные с траекторией распространения сигнала

Модели априорной коррекции PPP	Величина	СКО	Вид
Тропосферная задержка (сухая)	1–2 м	1 мм	Модель
Тропосферная задержка (влажная)	10–30 см	-	Оценивается/Коррекция
Ионосферная задержка (1-го порядка)	10–20 м	1 м	Исключается линейной комбинацией
Ионосферная задержка (более высокого порядка)	10 мм	1 мм	Не учитывают/Калибровка
Эффект многопутности	10 мм	-	
Набег фазы несущей	< 1 цикл	-	Модель

Таблица 3 – Систематические ошибки, связанные с приемником

Модели априорной коррекции PPP	Величина	СКО	Вид
Твердый Земной прилив	10–40 см	1 мм	Коррекция
Прилив океанической нагрузки	10 см	1–2 мм	Модель/Коррекция
Прилив полюса	25 мм	-	Калибровка
Прочие нагрузки	1 см		
Смещение часов приемника	< 1 мс	-	Оценивается
Смещение фазового центра антенны (PCO)	5–15 см	1 см	Коррекция
Вариации фазового центра (PCV)	1–3 см	1–2 мм	Коррекция
Дифференциальное смещение кода			Устраняется в ИСЛК
Дифференциальное смещение фазы			

Одними из немаловажных параметров, необходимых для высокоточного определения координат наземного пункта, являются смещения и вариации фазового центра антенны приемника и спутника. Передаваемые современными группировками ГНСС ЭВИ позволяют определять положение спутниковой антенны для непосредственного использования при определении местоположения. При этом не требуется никаких знаний об ориентации космического аппарата, так как достижение предельной точности

определения координат пункта ограничено в соответствии с потребностями навигации на основе измерений псевдодальностей. Высокоточная ЭВИ для реализации метода PPP, напротив, привязана к центру масс космического аппарата (ЦМКА) (Center of Mass – CoM), который является основной точкой отсчета для моделирования орбиты. Однако высокоточное позиционирование возможно только тогда, когда известно положение фазовых центров передающей и принимающей антенны, а также если известно смещение и ориентация вектора смещения спутниковой антенны в пространстве. Значения для конкретных спутников и частот, используемые при оценке высокоточной ЭВИ, предоставляемой МГС, предоставляются как часть модели МГС ANTEX [73, 50, 62, 49].

Фазовые центры всех НКА смещены от одного до нескольких метров в направлении оси z (по отношению к Земле), а некоторые НКА имеют смещение и в направлении оси x , которая номинально находится в плоскости, содержащей Солнце, НКА и Землю. В дополнение к смещению фазового центра (СФЦ) НКА должна быть известна и ориентация корпуса НКА относительно общеземной системы отсчета. Базовые законы ориентации для отдельных созвездий ГНСС и типов спутников позволяют определить ориентацию НКА для любого положения на орбите и обеспечить хорошее приближение к истинному положению фазового центра антенны спутника, за исключением коротких периодов полуденных и полуночных поворотов во время сезона затмений.

Поскольку предположение об общем фазовом центре для всех сигналов и направлениях в прямой видимости только частично верно, при высокоточном определении координат необходимо учитывать дополнительные вариации фазового центра (ВФЦ) (Phase Center Variation – PCV). С 5 ноября 2006 г. (неделя GPS 1400) МГС утвердила калибровочные таблицы абсолютных значений ВФЦ как для спутниковых антенн, так

и для антенн приемников, которые были доступны в МГС. Файлы абсолютных значений ВФЦ (например, igs08.atx для ITRF08, igs14.atx для ITRF14 и т. д.) содержат параметры ВФЦ для всех НКА и практически для всех моделей геодезических антенн, используемых в МГС. Калибровка ВФЦ антенны приемника обычно выполняется с использованием калибровочного механизма в виде роботизированного манипулятора с антенной [72, 33, 96] и включает измеренные СФЦ вместе с ВФЦ для каждого НКА, которые зависят от угла возвышения и азимута.

Рекомендуется использовать абсолютные ВФЦ, вычисленные в МГС в решениях PPP для согласованности с ЭВИ, но только при наличии ВФЦ антенны приемника. Если для антенны приемника доступна только относительная калибровка ВФЦ или она вовсе отсутствует, то следует использовать номинальные смещения спутниковой антенны и не использовать значения ВФЦ. Реализация метода PPP с использованием ВФЦ для антенн НКА вместе с антенной приемника без или с относительными ВФЦ может привести к большим (дециметровым) ошибкам в определении координат [89].

Некоторые современные приемники позволяют вводить параметры ВФЦ антенны непосредственно в приемник, в таком случае следует учитывать только ВФЦ антенны спутника и использовать ЭВИ, относящуюся к ЦМКА.

К основным недостаткам метода PPP можно отнести низкую обусловленность задачи определения координат, что приводит к продолжительному времени инициализации решения (5–30 минут) и повторной инициализации после разрывов фазовых измерений, а также низкой точности определения постоянных параметров (неоднозначности фазовых измерений) и медленно меняющихся параметров (зенитная тропосферная задержка).

1.4 Метод Precise Point Positioning с разрешением неоднозначности

1.4.1 Метод PPP-RTK

Концепция PPP-RTK впервые была предложена Wübbena [97] в 2005 г. Метод PPP-RTK можно рассматривать как расширение модели PPP, которое позволяет пользователям достигать высокоточного позиционирования с использованием одного приемника с более высокой точностью и скоростью сходимости, в сравнении с классическим методом PPP, за счет применения разрешения неоднозначности. В отличие от передачи поправок в ППН, которая представляет собой сумму всех ошибок, связанных с ГНСС, поправки PPP-RTK передаются в форме ПСС, что дает возможность передавать детализированные поправки, такие как высокоточная ЭВИ, ионосферные и тропосферные задержки, а также некалиброванные фазовые задержки (НФЗ) (англ. Uncalibrated Phase Delay – UPD). Поправки в ПСС значительно снижают нагрузку на каналы связи и тем самым их использование позволяет обеспечивать корректирующей информацией большее количество пользователей [55, 56]. Кроме того, ошибки различных временных и пространственных характеристик могут быть представлены отдельно, что может привести к возможному улучшению характеристик позиционирования. В этом смысле PPP-RTK может достичь той же точности и производительности, что и RTK, но с более широкой зоной покрытия, меньшей нагрузкой на каналы связи и более высокой устойчивостью к ошибкам, что делает PPP-RTK перспективной технологией для новых решений массового рынка и транспортных средств.

Работу технологии PPP-RTK можно разделить на два основных этапа: прием измерений от станций ПДБС, ЭВИ, НФЗ и атмосферных поправок на основе наблюдений на региональных / глобальных сетях ПДБС и передача необходимой корректиру-

ющей информации пользователю, для реализации быстрого разрешения фазовой неоднозначности в методе PPP. Общий порядок работы технологии PPP-RTK показан на рисунке 4.

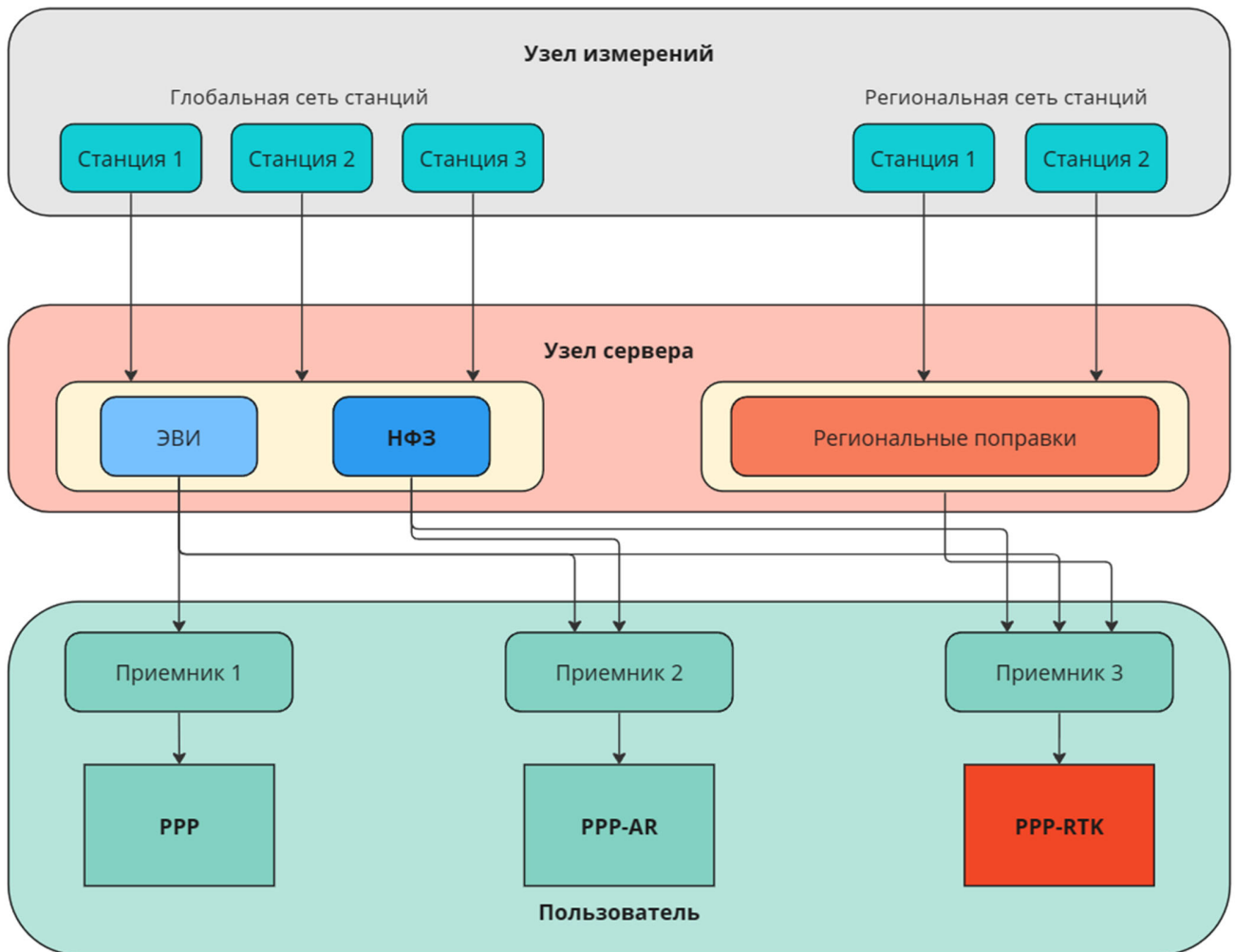


Рисунок 4 – Общий порядок работы технологии PPP-RTK [46]

Модель метода PPP с внешними атмосферными параметрами позволяет эффективно сокращать влияние ионосферных и тропосферных задержек и сократить время сходимости решения. Для разрешения неоднозначности обычно используется подход каскадного устранения неоднозначности для некомбинированной модели PPP, где

неоднозначности Wide-Lane (WL) и L1 устраняются шаг за шагом [30]. Например, в оценках НФЗ неоднозначности WL фиксируются, а затем могут быть введены в модель PPP в качестве виртуальных наблюдений для лучшей оценки неоднозначностей L1. Благодаря этим ограничениям определение вещественных неоднозначностей L1 будет повышено, что позволит выполнить оценку целочисленной составляющей. Существует три хорошо известных метода целочисленной оценки, включая целочисленное округление [21], целочисленную начальную загрузку [83] и корректировку декорреляции неоднозначности методом наименьших квадратов (LAMBDA) [84]. Доказано, что последний метод является оптимальным в силу максимальной вероятности правильной целочисленной оценки. Для проверки разрешения неоднозначности используются два показателя, известные как показатель успешности начальной загрузки и значение коэффициента Ratio. Более того, с увеличением числа доступных спутников, для разрешения неоднозначности с несколькими группировками обычно используется стратегия частичного разрешения неоднозначности [79, 65].

1.4.2 Метод PPP-AR

Помимо технологии PPP-RTK, существуют реализации разрешения неоднозначности в методе PPP без использования корректирующей информации от ПДБС региональной сети. Выделяют две основных модели разрешения неоднозначности для метода PPP: целочисленная модель часов [29] и модель некалиброванных фазовых задержек [28]. Есть работы, демонстрирующие возможность разрешения неоднозначностей в методе PPP при использовании некомбинированной трехчастотной модели отдельных часов [64, 30, 31, 78, 52], но такие решения на данный момент находятся на уровне исследований и не имеют широкого применения.

Так или иначе модели разрешения неоднозначности связаны с комбинацией Melbourne-Wübbena, представленной в уравнении:

$$L_{r,m}^s = \lambda_m (A_{r,w}^s + \frac{b_{r,i} - b_i^s}{\lambda_i} - \frac{b_{r,j} - b_j^s}{\lambda_j}) - \lambda_n (\frac{d_{r,i} - d_i^s}{\lambda_i} + \frac{d_{r,j} - d_j^s}{\lambda_j}), \quad (25)$$

где $\lambda_w = \frac{c}{f_i - f_j}$ и $\lambda_n = \frac{c}{f_i + f_j}$ – широкополосная и узкополосная длина волны;

$A_{r,w}^s = A_{r,i}^s - A_{r,j}^s$ – широкополосная неоднозначность;

$b_{r,i}, b_i^s$ и $b_{r,j}, b_j^s$ – фазовые задержки в единицах длины для сигналов i и j ;

$d_{r,i}, d_i^s$ и $d_{r,j}, d_j^s$ – кодовые задержки в псевдодальностей i и j .

Широкополосную неоднозначность можно вычислить с помощью $L_{r,m}^s$, при условии, что фазовые задержки на станции и спутнике будут вычислены как

$$\begin{aligned} b_{r,w} &= \lambda_w \left(\frac{b_{r,i}}{\lambda_i} - \frac{b_{r,j}}{\lambda_j} \right) - \lambda_n \left(\frac{d_{r,i}}{\lambda_i} + \frac{d_{r,j}}{\lambda_j} \right), \\ b_w^s &= \lambda_w \left(\frac{b_i^s}{\lambda_i} - \frac{b_j^s}{\lambda_j} \right) - \lambda_n \left(\frac{d_i^s}{\lambda_i} + \frac{d_j^s}{\lambda_j} \right). \end{aligned} \quad (26)$$

Уравнения (25) и (26) по оценке широкополосных фазовых задержек и разрешении широкополосных неоднозначностей являются основными для моделей целочисленных часов и некалиброванных фазовых задержек. В частности, широкополосная фазовая задержка в уравнениях (26) может быть оценена с использованием операции целочисленного округления, поскольку для неоднозначности одной станции значение имеет только дробная часть цикла. Так как невозможно вычислить абсолютные фазо-

вые задержки, необходимо определить эталонную фазовую задержку для уравнений измерений.

Когда произойдет разрешение широкополосной неоднозначности, уравнение измерений можно представить как:

$$\begin{aligned} P_{r,IF}^s &= \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + d_{r,IF} - d_{IF}^s + \epsilon_{P_{IF}}^s, \\ \bar{L}_{r,IF}^s &= \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + \lambda_n A_{r,j}^s + b_{r,IF} - b_{IF}^s + \epsilon_{L_{IF}}^s, \end{aligned} \quad (27)$$

где $\bar{L}_{r,IF}^s$ – новое измерение фазы несущей в ИСЛК после исправления для разрешенной широкополосной неоднозначности;

$\lambda_n A_{r,j}^s$ – узкополосная неоднозначность.

Стоит отметить, что кодовые и фазовые задержки в уравнении (27) линейно связаны с поправками часов и параметрами неоднозначности, в отличие от классической реализации, где оцениваются только координаты, часы приемника, ВТЗ и неоднозначности, не связанные с обработкой данных. В результате кодовые и фазовые задержки будут ассимилированы в параметры часов и неоднозначности. Несмотря на это, репараметризация уравнения будет зависеть от того, как мы определяем часы, которые будут оцениваться, в виде модели целочисленных часов или в виде некалиброванных фазовых задержек.

Целочисленная модель часов. Фундаментальная идея целочисленной модели часов заключается в том, что узкополосные неоднозначности фиксируются в целых числах до оценивания поправок часов. В этом случае фазовые задержки будут поглощаться параметрами часов [52]:

$$\begin{aligned}
P_{r,IF}^s &= \rho_r^s + c\left(dt_r + \frac{b_{r,IF}}{c}\right) - c\left(dt^s + \frac{b_{IF}^s}{c}\right) + T_r^s + (d_{r,IF} - b_{r,IF} - d_{IF}^s + b_{IF}^s) + \epsilon_{P_{IF}}^s, \\
\bar{L}_{r,IF}^s - \lambda_n \tilde{A}_{r,i}^s &= \rho_r^s + c\left(dt_r + \frac{b_{r,IF}}{c}\right) - c\left(dt^s + \frac{b_{IF}^s}{c}\right) + T_r^s + \epsilon_{L_{IF}}^s
\end{aligned} \tag{28}$$

где $\lambda_n \tilde{A}_{r,i}^s$ – разрешенная узкополосная неоднозначность.

Важно отметить, что $\frac{b_{IF}^s}{c}$ – это целочисленные часы для спутника s , которые бу-

дут использоваться вместе с широкополосными фазовыми задержками для реализации PPP-AR [29] согласно системе уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{r,m}^s + \hat{b}_w^s = \lambda_w A_{r,w}^s + b_{r,w} \\ P_{r,IF}^s + c\hat{t}_{IC}^s \approx \rho_r^s + ct_{r,IC} \\ L_{r,IF}^s + c\hat{t}_{IC}^s - \frac{f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \lambda_j \tilde{A}_{r,w}^s = \rho_r^s + ct_{r,IC} + \lambda_n A_{r,i}^s \end{array} \right. , \tag{29}$$

где \hat{b}_w^s – оценка широкополосной фазовой задержки;

\hat{t}_{IC}^s – оценка целочисленных часов спутника $\hat{t}_{IC}^s = t^s + \frac{b_{IF}^s}{c}$;

$t_{r,IC}$ – целочисленные часы приемника $t_{r,IC} = t_r + \frac{b_{r,IF}}{c}$;

$A_{r,w}^s$ и $A_{r,i}^s$ – широкополосная и узкополосная неоднозначность, соответственно.

При этом широкополосная неоднозначность должна быть разрешена раньше, чем узкополосная, а оценка узкополосной неоднозначности будет целым числом относи-

тельно эталонной неоднозначности. Выражение $(d_{r,IF} - b_{r,IF} - d_{IF}^s + b_{IF}^s)$ в уравнении (29) не учитывается, так как его нельзя явно оценить.

Модель некалиброванных фазовых задержек. В отличие от целочисленной модели часов (28), Ge и др. в работе [28] предположили, что определение спутниковых часов не обязательно, вместо этого можно использовать устаревшие оценки часов от МГС для модели некалиброванных фазовых задержек. Для каждой опорной станции выполняется обычная обработка измерений методом PPP для оценки часов приемника, ВТЗ и фазовых неоднозначностей. Подобно целочисленной модели часов, кодовые и фазовые задержки в уравнении (27) необходимо ассимилировать с теми параметрами, которые необходимо оценить, в данном случае не только с часами, но и с неоднозначностями. Точнее, постоянные части кодовых и фазовых задержек объединяются с неоднозначностями, а части, изменяющиеся во времени, сочетаются с часами [100]. Соответственно переформированное уравнение (27) будет выглядеть следующим образом:

$$P_{r,IF}^s = \rho_r^s + c(dt_r + \frac{\Delta d_{r,IF} + \delta b_{r,IF}}{c}) - c(t^s + \frac{\Delta d_{IF}^s + \delta b_{IF}^s}{c}) + T_r^s + (\delta d_{r,IF} - \delta d_{IF}^s - \delta b_{r,IF} + \delta b_{IF}^s) + \epsilon_{P_{IF}}^s, \quad (30)$$

$$\bar{L}_{r,IF}^s = \rho_r^s + c(dt_r + \frac{\Delta d_{r,IF} + \delta b_{r,IF}}{c}) - c(t^s + \frac{\Delta d_{IF}^s + \delta b_{IF}^s}{c}) + T_r^s + \lambda_n (A_{r,i}^s + \frac{\Delta b_{r,IF} - \Delta d_{r,IF}}{\lambda_n} - \frac{\Delta b_{IF}^s - \Delta d_{IF}^s}{\lambda_n}) + \epsilon_{L_{IF}}^s,$$

что на самом деле является стандартной функциональной моделью, используемой МГС для обработки данных:

$$\begin{aligned}
t_{r,F} &= t_r + \frac{\Delta d_{r,IF} + \delta b_{r,IF}}{c}, \\
t_F^s &= t_r + \frac{\Delta d_{IF}^s + \delta b_{IF}^s}{c},
\end{aligned} \tag{31}$$

где уравнение (31) есть теоретическая форма устаревших часов МГС. Как указывалось выше, устаревшие часы МГС зафиксированы во всей модели НФЗ, и, следовательно, можно переписать уравнение (30), вводя обозначения из уравнения (31), как

$$\begin{aligned}
P_{r,IF}^s + c\hat{t}_F^s &= \rho_r^s + ct_{r,F} + T_r^s + (\delta d_{r,IF} - \delta d_{IF}^s - \delta b_{r,IF} + \delta b_{IF}^s) + \epsilon_{P_{IF}}^s, \\
\bar{L}_{r,IF}^s + c\hat{t}_F^s &= \rho_r^s + ct_{r,F} + T_r^s + \lambda_n \left(A_{r,i}^s + \frac{\Delta b_{r,IF} - \Delta d_{r,IF}}{\lambda_n} - \frac{\Delta b_{IF}^s - \Delta d_{IF}^s}{\lambda_n} \right) + \epsilon_{L_{IF}}^s,
\end{aligned} \tag{32}$$

где \hat{t}_F^s – оценка устаревших часов МГС;

$$\left(A_{r,i}^s + \frac{\Delta b_{r,IF} - \Delta d_{r,IF}}{\lambda_n} - \frac{\Delta b_{IF}^s - \Delta d_{IF}^s}{\lambda_n} \right) - \text{оцениваемая узкополосная неоднозначность.}$$

Из оценок узкополосных неоднозначностей в уравнении (32) возможно извлечь узкополосные фазовые задержки для приемника и спутника в единицах длины:

$$\begin{aligned}
b_{r,n} &= \Delta b_{r,IF} - \Delta d_{r,IF}, \\
b_n^s &= \Delta b_{IF}^s - \Delta d_{IF}^s,
\end{aligned} \tag{33}$$

которые также относятся к кодовым и фазовым задержкам, подобно уравнению (32). Стоит отметить, что способ вычисления узкополосных фазовых задержек аналогичен способу вычисления широкополосных фазовых задержек (31). Но, как и ранее, нельзя

оценить абсолютные узкополосные фазовые задержки, и, следовательно, для получения фазовых задержек следует выбирать произвольный эталон.

Получив оценки как широкополосных, так и узкополосных фазовых задержек, можно внести эти поправки в уравнения измерений метода PPP как

$$\begin{cases} L_{r,m}^s + \hat{b}_w^s = \lambda_w A_{r,w}^s + b_{r,w} \\ P_{r,IF}^s + c\hat{t}_F^s \approx \rho_r^s + ct_{r,F} \\ L_{r,IF}^s + c\hat{t}_F^s - \frac{f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \lambda_j \tilde{A}_{r,w}^s + \hat{b}_n^s = \rho_r^s + ct_{r,F} + \lambda_n A_{r,i}^s + b_{r,n} \end{cases}, \quad (34)$$

где \hat{b}_n^s – оценка узкополосной фазовой задержки, определенная в модели НФЗ;

$A_{r,i}^s$ – узкополосная неоднозначность, которая, как утверждается, является целым числом, подлежащим разрешению, поскольку значение \hat{b}_n^s было исправлено в левой части уравнения фазы несущей.

Обе модели разрешения неоднозначности, согласно исследованиям [52, 65, 15, 30, 13] позволяют эффективно разрешать фазовые неоднозначности в уравнениях измерений метода PPP, что повышает надежность и скорость получения высокоточного решения.

1.5 Метод относительного позиционирования

1.5.1 Real-Time Kinematic для короткой базовой линии

Для относительного позиционирования на основе измерений фазы несущей с короткой базовой линией ($< 10\text{--}25$ км) между мобильной станцией (МС) r и базовой станцией (БС) b обычно используются следующие уравнения измерения двойных разностей для фазового диапазона L_i и псевдодальностей. В этих уравнениях смещение часов спутника и приемника, а также ионосферные и тропосферные эффекты и другие незначительные факторы практически исключаются за счет использования уравнений двойных разностей фаз несущей, а для получения геометрической дальности ρ_{rb}^{jk} , положение БС r_b фиксируется на заранее определенных значениях [2, 103, 1]:

$$P_{rb,i}^{jk,G} = \rho_{rb}^{jk} + \epsilon_P, \quad (35)$$

$$\Phi_{rb,i}^{jk,G} = \rho_{rb}^{jk} + \lambda_i (B_{rb,i}^j - B_{rb,i}^k) + d\Phi_{r,i}^s + \epsilon_\Phi, \quad (36)$$

$$B_{rb,i}^j = \rho_{rb,i}^j + cdt_{rb,i} + T_{rb,i}^j - I_{rb,i}^j + \lambda M_{rb,i}^j + \epsilon_{rb,i}^j, \quad (37)$$

$$B_{rb,i}^k = \rho_{rb,i}^k + cdt_{rb,i} + T_{rb,i}^k - I_{rb,i}^k + \lambda M_{rb,i}^k + \epsilon_{rb,i}^k, \quad (38)$$

где G – индекс системы GPS;

$B_{rb,i}^j$ и $B_{rb,i}^k$ – уравнения измерений фазы несущей одинарной разности между приемниками для одного спутника в момент времени i , $B_{rb,i}^j = B_{b,i}^j - B_{r,i}^j$ и $B_{rb,i}^k = B_{b,i}^k - B_{r,i}^k$;

$M_{rb,i}^j = \delta_{rb,i} + N_{rb,i}^j$; $M_{rb,i}^k = \delta_{rb,i} + N_{rb,i}^k$ – сумма целочисленной фазовой неоднозначности (в циклах) и фазовой задержки приемника;

$d\Phi_{r,i}^s$ – это набор поправок фаз несущей, которыми можно пренебречь в случае короткой базовой линии, за исключением вариации фазового центра антенны приемника, если на МС и БС используются разные антенны.

При формировании одинарных разностей между двумя спутниками выбирается опорный спутник с максимальным углом возвышения. Важно отметить, что между спутниками разных навигационных систем не формируются одинарные разности между спутниками, так как приемники обычно имеют разные межсистемные задержки для сигналов разных навигационных систем, даже если они имеют одинаковую несущую частоту.

Важным условием для решения уравнений двойных разностей фаз несущей является получение измерения одинарных разностей на одну и ту же эпоху, однако на практике приемники не синхронизированы идеально из-за разного смещения часов приемников. По мере увеличения разницы во времени точность решения постепенно ухудшается из-за дрейфа спутниковых часов и изменения ионосферной задержки. Чтобы компенсировать дрейф часов спутника, можно использовать параметры смещения бортовых часов спутников, для коррекции одинарных разностей.

В качестве оцениваемых параметров в векторе неизвестных оценивается базовая линия между МС и БС, вектор остаточных невязок и векторы смещений фазы несущей в одинарных разностях для диапазона L_i , вида $B_i = (B_{rb,i}^1, \dots, B_{rb,i}^m)^T$, при $i = 1, 2$ и 5 соответственно.

Главным недостатком РТК с короткой базовой линией является ограниченная область действия: высокая точность позиционирования обеспечивается в радиусе нескольких десятков километров от ближайшей базовой станции. Для применения этого

метода пользователю необходимо подключаться к базовой станции в данном районе и получать в режиме реального времени синхронные результаты ГНСС-измерений от этой станции. Одним из важнейших преимуществ метода RTK с короткой базовой линией является малое время инициализации решения при нахождении вблизи базовой станции.

1.5.2 Real-Time Kinematic для длинной базовой линии

При реализации относительного метода с длинной базовой линией ($> 50\text{--}500$ км) могут быть сформированы следующие уравнения измерения двойных разностей фаз несущей на основе уравнений для короткой базовой линии:

$$P_{rb,i}^{jk,G} = \rho_{rb}^{jk} + I_{rb,i}^{jk} + T_{rb}^{jk} + \epsilon_P, \quad (39)$$

$$\Phi_{rb,i}^{jk,G} = \rho_{rb}^{jk} - I_{rb,i}^{jk} + T_{rb}^{jk} + \lambda_i (B_{rb,i}^j - B_{rb,i}^k) + d\Phi_{r,i}^s + \epsilon_\Phi, \quad (40)$$

где $I_{rb,i}^{jk}$ – ионосферная задержка диапазона L_i , м;

T_{rb}^{jk} – тропосферная задержка диапазона L_i , м.

Для уменьшения ошибки часов бортовых эфемерид для базовой линии более 50–100 км следует использовать точные эфемериды. В наборе поправок фаз несущей $d\Phi_{r,i}^s$ эффекты земных приливов следует учитывать для базовой линии длиной более 500 км. Для устранения ионосферных задержек иногда формируют ИСЛК или напрямую оценивают ионосферную задержку с помощью двух- или трехчастотных ГНСС-измерений, посредством РФК.

Учитывая вышеописанные замечания, вектор оцениваемых параметров будет состоять из вектора базовой линии между МС и БС, вектора остаточных невязок, векторов ВТЗ для МС и БС, вектора вертикальных составляющих ионосферной задержки в одинарных разностях для диапазона L_i и вектора смещений фазы несущей в одинарных разностях для диапазона L_i .

1.5.3 Режим подвижной базовой линии Moving-Baseline

Режим подвижной базовой линии Moving-Baseline (МВ) используется, если МС и БС движутся и требуется определить положение МС относительно БС [14, 34, 90, 14]. В режиме подвижной базовой линии положение БС не является фиксированным, а оценивается абсолютным методом [2]. После получения координат БС они фиксируются на момент времени в расчетном положении РФК для оценки координат МС с помощью относительного метода в уравнениях для короткой базовой линии, описанного в (35)–(38).

Режим подвижной базовой линии является перспективным способом высокоточного позиционирования, который позволит выполнять оценку координат МС на основе высокоточной оценки подвижной базовой станции (ПБС), которой можно добиться за счет применения методов PPP или PPP-RTK в режиме реального времени. Способ применения режима подвижной базовой линии в концепции коллаборативного высокоточного позиционирования описан во втором разделе и является одним из основных способов определения высокоточных координат МС.

1.6 Метод сетевого RTK (N-RTK)

Одним из существенных недостатков относительного метода в режиме реального времени с одной базовой станцией является то, что максимальное расстояние между

базовой станцией и мобильной станцией не должно превышать нескольких десятков километров для быстрого и надежного разрешения целочисленной неоднозначности фазы несущей. Это ограничение вызвано зависящими от расстояния погрешностями, в основном неучтенной рефракцией сигнала в ионосфере, а также поправками орбиты и тропосферной рефракцией.

Указанные выше поправки можно достаточно точно смоделировать, используя измерения сети ПДБС, окружающих МС. Такой способ определения координат МС стал популярным под названием «сетевой RTK», иногда сокращенно N-RTK. Фактически, сетевой RTK также имеет ограничение по расстоянию. Это ограничение относится к расстояниям между ПДБС, которое не должно превышать 100–200 км [103], для возможности создания высокоточных моделей коррекции в режиме реального времени. Так, для покрытия полем поправок за влияние ионосферы и тропосферы площади в 100 000 км² (чуть больше половины Новосибирской области) требуется сеть из примерно 20 ПДБС, расположенных на расстоянии 75 км, если используется сетевой метод RTK [25].

Для создания моделей коррекции в реальном времени требуется выполнять обработку измерений со станций сети ПДБС на одном участке обработки данных, откуда на МС поступают сетевые поправки и коэффициенты модели, позволяющие выполнять N-RTK-позиционирование.

Существуют различные варианты сетевого метода [58, 42, 25, 16, 102]:

- виртуальные базовые станции: Virtual Reference Station (VRS);
- псевдобазовые станции: Pseudo Reference Station (PRS);
- площадные корректирующие параметры: Area Correction Parameters (Flächen Korrektur Parameter – FKP);
- концепция опорных и вспомогательных базовых станций: Master and Auxiliary Reference Stations (Master-Auxiliary Concept – MAC);

– индивидуализированная концепция опорных и вспомогательных станций: Individualized Master-Auxiliary Concept (iMAC).

Основные этапы обработки данных между сбором измерений с опорных станций и результатом определения местоположения МС представлены на рисунке 5.

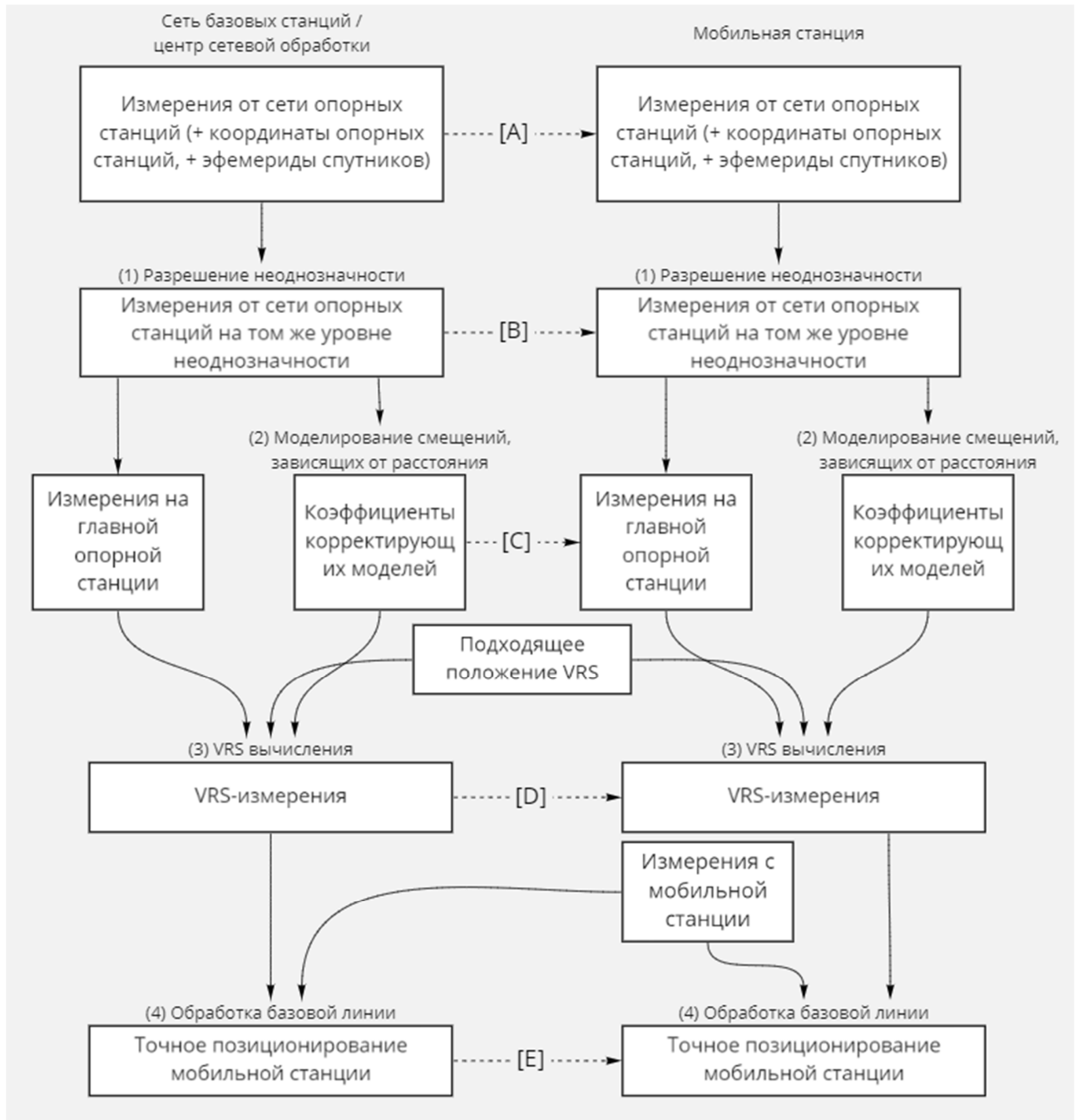


Рисунок 5 – Этапы обработки сетевого RTK [102]

Мобильная станция получает потоки измерений от нескольких ПДБС, окружающих ее позицию. После разрешения неоднозначности на основе данных сети МС может оценить сетевые поправки и при необходимости использовать измерения от VRS. Такая методика получила название «концепция опорных и вспомогательных базовых станций: Master and Auxiliary Reference Stations (Master-Auxiliary Concept – MAC)». Основным недостатком этого метода связан с разрешением неоднозначности на основе сетевых поправок, который обычно требует времени инициализации в несколько минут.

Другим вариантом передачи поправок от сети ПДБС является способ передачи измерений и дифференциальных поправок с опорной базовой станции. Пользователь МС использует корректирующую информацию вместе со своими измерениями в соответствии с разностью координат между его положением и положением опорной базовой станции и, таким образом, получает наблюдения VRS для своего участка. Этот метод получил название от аббревиатуры немецкого термина «параметр Флехена – Корректур», площадных корректирующих параметров: Area Correction Parameters (Flächen Korrektur Parameter – FKP).

Вычисление наблюдений VRS предполагает сдвиг основных эталонных наблюдений в выбранное положение VRS. Этот сдвиг фактически состоит из двух разных процессов: один выполняет геометрический сдвиг наблюдений, с учетом изменения расстояний до спутников, другой вносит поправки, зависящие от расстояния смещения в соответствии с широтными и долготными различиями между положением главной опорной станции и VRS. Практика показывает, что остаточные ионосферные эффекты могут немного отличаться друг от друга при выполнении оценки региональной сетью ПДБС [66, 76, 78], из этого следует, что при определении базовой линии от VRS до МС влияние ионосферных задержек может быть больше, чем при выполнении из-

мерений для короткой базовой линии между реальной опорной станцией и МС. Как следствие, обработка базовой линии между VRS и МС не должна предполагать полного устранения ионосферных эффектов, что было бы правильно для очень короткой базовой линии между двумя реальными приемниками.

Часто используемая простая и надежная модель для сетевой коррекции RTK применяет горизонтальные градиенты ошибок, зависящие от расстояния, так как удобно отделять дисперсионные (ионосферные) ошибки от недисперсионных (тропосферных и орбитальных) ошибок. Такое разделение требует двухчастотных измерений фазы несущей на опорных станциях. Обычно достаточно трех опорных станций вокруг МС. Горизонтальные градиенты определяют плоскую корректирующую поверхность (рисунок 6). Таким образом, выполняется двумерная линейная интерполяция согласно ФКР.

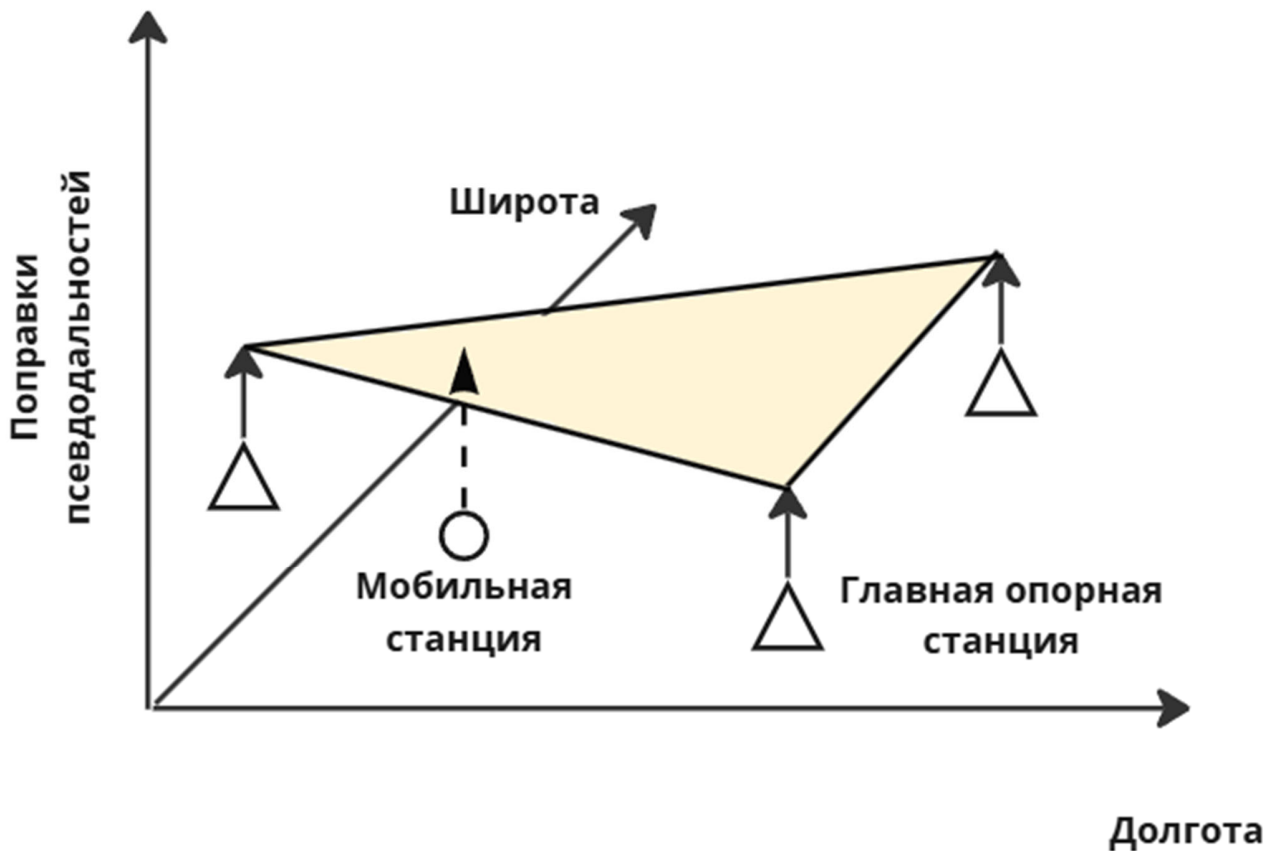


Рисунок 6 – Поправки с помощью линейной интерполяции

Наборы параметров FKP определяются для каждого отдельного спутника. Такой набор состоит из четырех значений, а именно: FKP_{N0}, FKP_{E0} , которые представляют собой зависящие от расстояния градиенты недисперсионных ошибок в миллионных долях для направлений «север – юг» и «восток – запад» соответственно, и FKP_{NI}, FKP_{EI} , которые являются зависящими от расстояния градиентами дисперсионных ошибок, масштабированными с учетом их влияния на частоту GPS L1 в миллионных долях для направлений «север – юг» и «восток – запад» соответственно. Погрешности, зависящие от расстояния в метрах для недисперсионных и дисперсионных компонентов, вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned}\delta e_0 &= FKP_{N0}\Delta r_N + FKP_{E0}\Delta r_E \\ \delta e_I &= FKP_{NI}\Delta r_N + FKP_{EI}\Delta r_E\end{aligned}\quad (41)$$

где Δr_N и Δr_E – разности горизонтальных координат в километрах для направлений «север – юг» и «восток – запад», соответственно.

Ошибки, зависящие от расстояния $\delta e_\varphi, \delta e_p$ для измерения фазы несущей и псевдодальности частоты f , вычисляются следующим образом:

$$\delta e_\varphi(f) = \delta e_0 + \frac{f_i^2}{f^2} \delta e_I, \quad (42)$$

$$\delta e_p(f) = \delta e_0 - \frac{f_i^2}{f^2} \delta e_I, \quad (43)$$

где f_i – это L1 частота GPS.

Существуют и другие варианты уравнений (41)–(43), которые также используются на практике. Типичный временной ряд значений ФКР показан на рисунке 7 [75].

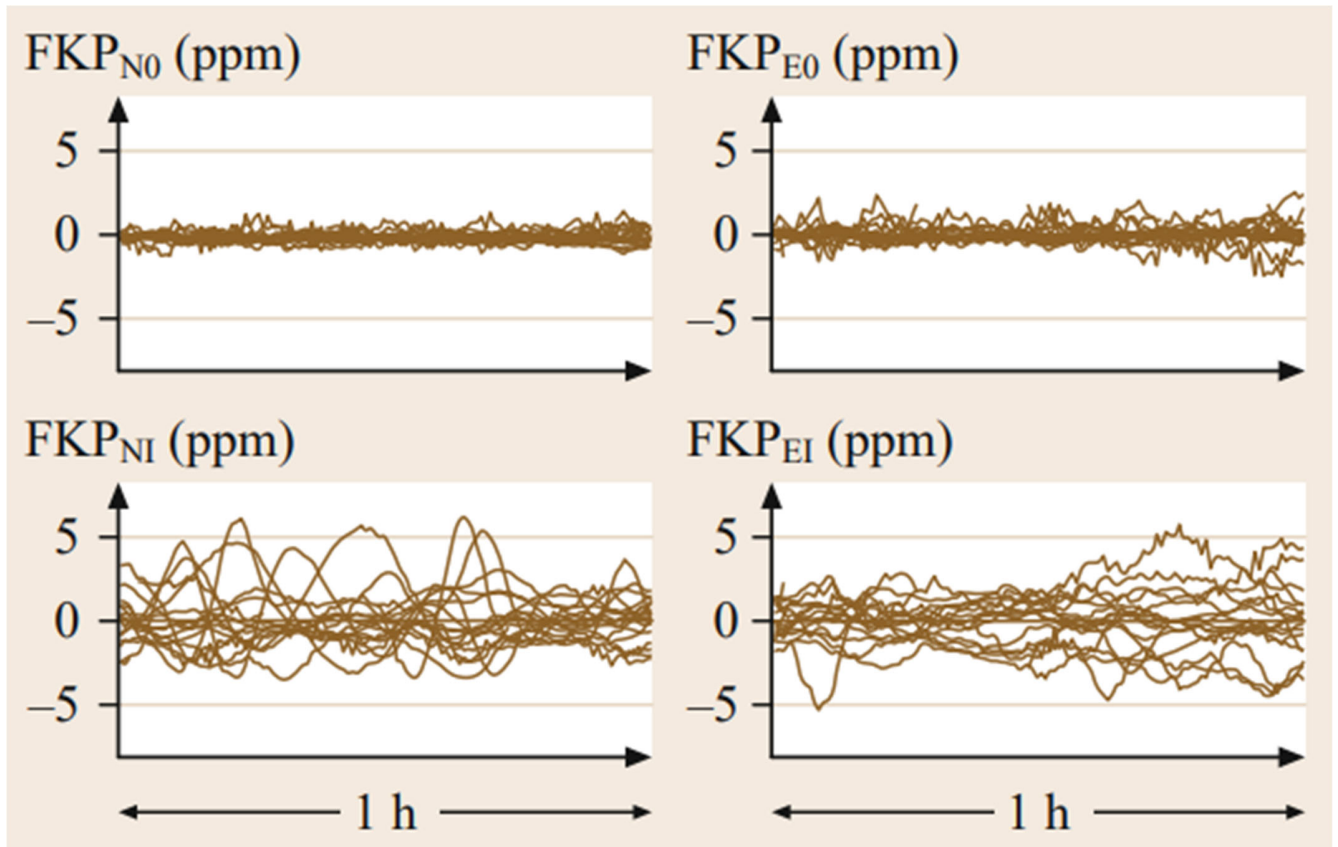


Рисунок 7 – Временные ряды значений ФКР [75]

Каждый график коэффициентов модели относится к конкретному спутнику. Коэффициенты дисперсии часто больше по размеру и демонстрируют более кратковременные колебания. Это подчеркивает, что следует рассматривать возможность их более частого обновления в качестве значений, которые корректируют недисперсион-

ные эффекты, например, каждые 10 с по сравнению с каждыми 60 с для недисперсионных эффектов.

1.7 Спутниковые функциональные дополнения космического базирования

Для задач, где использование дорогостоящей фазовой ГНСС-аппаратуры невозможно / не оправдано, или если МС расположены на слишком большой территории, спутниковые функциональные дополнения космического базирования (СФДК) (англ. – Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS)) могут оказаться более подходящим решением для высокоточного определения местоположения в реальном времени.

Спутниковые функциональные дополнения космического базирования используют сеть наземных станций для постоянного наблюдения за работой навигационных спутников. Пункты сети ПДБС отправляют свои измерения на главные опорные станции сети, которые определяют дифференциальные поправки. Каждая главная опорная станция обрабатывает измерения и передает данные на станцию спутниковой связи. Станция спутниковой связи передает корректирующую информацию конечным пользователям через спутник на геостационарной околоземной орбите. Любая СФДК состоит из нескольких главных опорных станций, станций спутниковой связи и геостационарных спутников, которые дополняют основные спутниковые группировки следующими тремя функциями: дифференциальные поправки; мониторинг целостности; ранжирование.

Станции спутниковой связи СФДК передают дифференциальные поправки для каждого геостационарного спутника, отслеживаемого наземной сетью, в том числе и поправки за эффекты ионосферной задержки, относимые к территории, покрывае-

мой сетью ПДБС. Применяя эти поправки к измерениям псевдодальностей, пользователь НАП повышает точность своего местоположения.

СФДК также транслируют границы ошибок для каждого наблюдаемого спутника и каждого параметра ионосферной коррекции. Эти границы ошибок используются для определения максимально возможной ошибки определения местоположения в воздухе, которая может остаться после применения дифференциальных поправок. Границы ошибок генерировать значительно сложнее, чем дифференциальные поправки, поскольку вероятность того, что граница ошибки положения не превысит истинную ошибку, должна быть меньше 10^{-7} за применение. Кроме того, эта информация должна обновляться в течение 6 секунд после возникновения любого небезопасного состояния.

Сигналы геостационарных спутников СФДК по своей структуре аналогичны сигналам GPS L1 (C/A), поэтому приемник с поддержкой СФДК использует, по существу, тот же способ определения сигнала, что и обычный приемник. Кроме того, сигналы СФДК синхронизируются с сигналами GPS, поэтому их можно использовать для определения дальности. Дополнительные измерения дальности добавляются к набору сигналов GPS для улучшения временной доступности и непрерывности определения местоположения.

Каждая главная опорная станция генерирует сетку поправок для ионосферы в своей зоне покрытия. Эта сетка имеет размеры 5 на 5 градусов по широте и долготе между 60 градусами южной широты и 60 градусами северной широты [70, 19]. Ионосферные поправки СФДК характерны для модели ионосферы в виде тонкой оболочки, существующей на высоте 350 км над поверхностью Земли [92]. Прямая видимость между приемником и спутником проходит через эту оболочку в точке, обозначенной

как точка прокола ионосферы. В НАП пользователя используются четыре значения регулярной сетки для интерполяции ионосферной задержки, характерной для каждого местоположения его точки прокола.

Главная опорная станция также генерирует векторную поправку для каждого спутника GPS с учетом опорной сети. Один элемент корректирует спутниковые часы, а остальные три элемента корректируют положение спутника по трем координатам. Эти поправки генерируются на основе измерений псевдодальности после устранения ионосферного эффекта и минимизации ошибок, связанных с тропосферой и многолучевым распространением. Границы остаточных ошибок ионосферных поправок называются сеточными ионосферными вертикальными ошибками (СИВО), они ограничивают ионосферную задержку для данной точки сетки при прохождении сигнала через эту точку вертикально. Сигналы, проходящие под другими углами, умножаются на коэффициент геометрического наклона, чтобы отрегулировать значения задержки и достоверности для более длинного пути сигнала. Главная опорная станция также ограничивает влияние ошибки, характерной для спутника, после коррекции, и эти границы называются ошибками дифференциального диапазона пользователя (ОДДП). Главная опорная станция упаковывает ионосферные поправки, поправки, специфичные для спутника, и прочую информацию в поток сообщений СФДК. Этот поток сообщений передается по восходящей линии на геостационарный спутник, который передает сообщение пользователям в любой точке геостационарной зоны.

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОЛЛАБОРАТИВНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

2.1 Принцип и схема методики

Различные реализации совместного или коллаборативного позиционирования (КП) были приняты в области беспроводных сенсорных сетей как подход к улучшению характеристик навигации и позиционирования людей и наземных транспортных средств [75]. Наибольшую эффективность такие решения показали в условиях, когда реализация позиционирования на основе ГНСС не может быть выполнена и / или, когда определение координат является критическим с точки зрения безопасности и требует более высокого уровня надежности и целостности. Такие реализации КП обычно используют доступную телекоммуникационную инфраструктуру для обмена информацией между пользователями, работающими в пределах определенного района или так называемой специальной сети.

Такие реализации КП нашли свое применение в интеллектуальных транспортных системах, которые называют «совместные интеллектуальные транспортные системы» (СИТС). СИТС – это технология, которая использует возможности беспроводной связи, позволяя транспортным средствам и окружающей инфраструктуре обмениваться информацией о местоположении, скорости и направлении движения других участников дорожного движения, также использующих СИТС [14]. Связь между транспортным средством и инфраструктурой (ТИИ) и между транспортным средством и другими транспортными средствами (ТИТ) поддерживается благодаря выделенным возможностям связи малой дальности (СМД), которые обеспечивают двустороннюю беспроводную связь малой и средней дальности и передачу данных с очень высокой скоростью, что критически важно для систем активной безопасности. Федеральная комиссия связи США выделила 75 МГц спектра в диапазоне 5,9 ГГц для ис-

пользования приложениями СИТС. Такая реализация КП в рамках СИТС способна обеспечивать уровень точности относительного позиционирования на субметровом уровне, а в абсолютных значениях на уровне 3–5 м, полная информация об уровнях точности, полученных из справочного документа о позиционировании транспортных средств технологией СИТС, ассоциации Austroads – (ассоциация транспортных агентств Австралии и Новой Зеландии), представлена в таблице 4 [91].

Таблица 4 – Уровень точности позиционирования СИТС

Тип кооперации	Зона позиционирования	СКО (95 %), м	Скорость передачи информации между пользователями, с
ТИИ: собственное решение	Дорога	5,0	1–5
	Сторона движения	1,1	1
	Конкретная полоса движения	0,7	0,1
ТИТ: относительное позиционирование	Дорога	5,0	0,1
	Сторона движения	1,5	0,1
	Конкретная полоса движения	1,0	0,01–0,1

В 2019 г., в рамках рабочей недели, проводимой Международной федерацией геодезистов, учеными Риззосом К. и Кроненбруком Дж. ван, было предложено другое представление КП в виде концепции, связанной с внедрением нового подхода к организации наземной инфраструктуры высокоточного координатного обеспечения на основе ГНСС [68]. Концепция подразумевает, что каждый пользователь ГНСС может

предоставлять корректирующую информацию в реальном времени другим пользователям, для формирования новой совместной наземной динамической инфраструктуры высокоточного позиционирования. Концепция имеет различные пути развития и может реализовываться по-разному, в зависимости от конкретных способов распределения и применения корректирующей информации. Исследователи делали акцент на применение режима подвижной базовой линии в реализации относительного метода (рисунок 8), но конечного решения не было предложено.

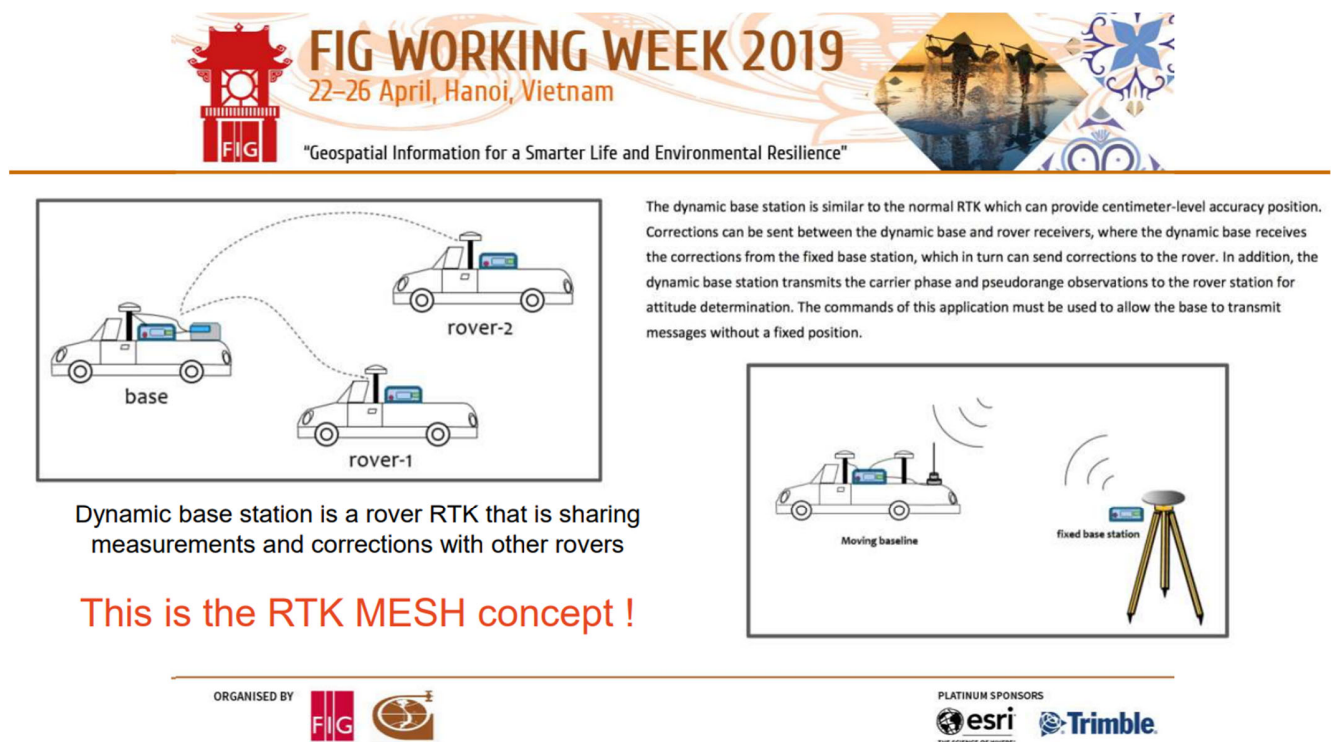


Рисунок 8 – Концепция коллаборативного позиционирования [68]

Реализация концепции может быть особенно многообещающей в контексте объединения метода PPP и RTK, сочетая в себе преимущества обоих методов, что и рассматривается в настоящем исследовании.

Такой подход позволяет решать следующие задачи:

- повышение надежности навигационного решения, обусловленное дублированием элементов системы и сравнением разных типов решения в режиме реального времени;
- многократное снижение нагрузки на телекоммуникационную сеть в сравнении со способом передачи поправок в представлении пространства наблюдений от постоянно действующих базовых станций для всех пользователей [97, 42];
- повсеместное покрытие высокоточным бесшовным навигационным полем;
- сокращение времени инициализации высокоточного решения до значений, характерных для RTK.

Процесс коллаборативного позиционирования должен быть полностью автоматическим, чтобы удовлетворить потребности новых категорий пользователей и решений, основанных на позиционировании для массового рынка, описанных в [6].

2.2 Модификация системы линейных алгебраических уравнений для учета дифференциальных кодовых задержек в многосистемных ГНСС-измерениях в методе PPP

В процессе исследования и подготовки методики КП было выявлено, что при выполнении позиционирования в режиме реального времени при многосистемных ГНСС-измерениях в методе PPP сильное влияние имеет эффект, вызванный задержкой при отправке кодового сигнала, известных как дифференциальная кодовая задержка (ДКЗ). Проявление ДКЗ выражается в систематических смещениях кодовых псевдодальностей, измеренных по разным сигналам от одного спутника на разных частотах. Попытки реализовать метод PPP с использованием многосистемных ГНСС-измерений без учета достаточного набора ДКЗ демонстрировали результаты,

уступающие по точности односистемному варианту с использованием лишь GPS-измерений [59, 6, 61].

ДКЗ можно разделить на два типа: внутрочастотные (intra-frequency) и межчастотные (inter-frequency) задержки [95]. Внутрочастотные задержки используются при измерениях C1/P2 и C2/P1, в которых необходимо исправлять задержки между P1-C1 и P2-C2 измерениями. В течение дня параметры ДКЗ для спутника и приемника считаются постоянными, шум измерений и погрешности, связанные с многолучевостью, имеют нулевое среднее значение за одни сутки, следовательно, комбинированные внутрочастотные задержки для каждой пары сигналов (спутник-плюс-приемник, англ. – satellite-plus-rover (SPR)) [61] могут быть определены из среднего значения:

$$SPR_{s_1-s_2} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (P_{s_1,k} - P_{s_2,k}), \quad (44)$$

где $P_{s_1,k}, P_{s_2,k}$ – псевдодальности, полученные одновременно путем измерений на одной частоте по двум сигналам s_1 и s_2 , в эпоху k ;

N – общее количество эпох.

Начиная с 2000 г. Европейский центр определения орбит CODE предоставляет модели задержек для P1-C1. Такие модели используются МГС для анализа поправок часов, публикуемых Международной службой ГНСС [71, 73].

Межчастотные задержки – это задержки между кодовыми наблюдениями на двух разных частотах. Для получения межчастотных задержек необходимы оценки полного содержания электронов в ионосфере, вычисленных из сырых мультисистемных ГНСС-измерений, локальные модели ионосферы и значения внутрочастотных задержек для конкретного спутника и приемника. Безыоносферные комбинации двухча-

стотных измерений могут использоваться для оценки межчастотных задержек, но на них серьезно влияют эффекты шума и многолучевости.

Оценки ДКЗ могут быть выделены в процессе оценивания параметров состояния ионосферы. В Институте геодезии и геофизики (англ. – Institute of Geodesy and Geophysics (IGG)) в Ухане разработан метод оценки ДКЗ, получивший название IGGDCB [57]. Метод IGGDCB использует локальную ионосферную информацию, генерируемую на основе всех доступных наблюдений спутников на каждой станции, что позволяет преодолеть нехватку современных станций слежения ГНСС для глобального моделирования ионосферы.

Рабочая группа по смещениям и калибровке МГС (Bias and Calibration Working Group) еще не выработала общих рекомендаций для выбора задержек с использованием нескольких ГНСС. Теоретически, если имеется N типов кодовых измерений, то необходимы только $N-1$ типов внутри- и межчастотных задержек, но получить такой набор ДКЗ на практике сложно по двум причинам. Во-первых, в стандарте RINEX4 [101] предусмотрено не более 15 различных сигналов на каждую ГНСС, которая может образовывать большее количество возможных пар сигналов и связанных с ними ДКЗ. Во-вторых, приемники не всегда поддерживают отслеживание соответствующих сигналов, которые использовались для заранее определенного типа ДКЗ.

На сайте информационной системы данных динамики земной коры NASA (Crystal Dynamics Data Information System) в разделе по ДКЗ опубликован архив с файлами ДКЗ от двух аналитических групп – Института геодезии и геофизики Китайской академии наук (CAS) в Ухане и Немецкого института аэрокосмических исследований (Deutsche Forschungsanstalt für Luftund Raumfahrt – DLR) [32]. Задержки на спутниках и станциях MGEX, рассчитанные Институтом геодезии и геофизики, публикуются с интервалом в два-три дня и доступны в виде суточных файлов в формате BSX.

Продукт DLR обновляется каждые три месяца и содержит недельные средние значения кодовых задержек на спутниках. Кроме того, для справочных целей и анализа регрессионных моделей предоставляется полный набор ежедневных кодовых задержек спутников и станций MGEX. В таблице 5 представлены типы сигналов [67], анализируемые рабочими группами из Китая и Германии.

Таблица 5 – Коды сигналов ГНСС, анализируемые рабочими группами CAS и DLR

ГНСС	DLR	CAS
GPS	C1C, C1W, C2L, C2S, C2X, C2W, C5Q, C5X	
ГЛОНАСС	C1C, C1P, C2C, C2P	
Galileo	C1C, C1X, C5Q, C5X, C7Q, C7X, C8Q, C8X, C6C	C1C, C1X, C5Q, C5X, C7Q C7X, C8Q, C8X
BeiDou-2	C2I, C6I, C7I	
BeiDou-3	C1X, C1P, C1D, C2I, C5X, C5P, C5D, C6I, C7Z, C8X	
QZSS	C1C, C1X, C2L, C2X, C5X, C5Q	

Попытки реализовать метод PPP с использованием многосистемных ГНСС-измерений без учета достаточного набора ДКЗ демонстрируют результаты, уступающие по точности односистемному варианту с использованием лишь GPS-измерений.

В классической односистемной реализации метода PPP учет ДКЗ не предполагался. Существует ряд исследований [9, 46, 100, 6], показывающих эффективность применения ДКЗ в уравнениях измерений методом PPP. Учитывая очевидную необходимость в учете ДКЗ при позиционировании в режиме реального времени, уравнения для многосистемных ГНСС-измерений в методе PPP будут выглядеть как:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{r_{IF}}^{s,W} = \rho_r^{s,W} + c \left(dt_r^W - dt^{s,W} + ISB_r^Y \right) + T_r^{s,W} + b_{P_{IF}}^{s,W} + \epsilon_{P_{IF}}^{s,W} \\ \Phi_{r_{IF}}^{s,W} = \rho_r^{s,W} + c \left(dt_r^W - dt^{s,W} + ISB_r^Y \right) + T_r^{s,W} + \lambda_{IF}^{s,W} \left(A_{IF}^{s,W} + \varphi_{pw}^{s,W} \right) + \epsilon_{\Phi_{IF}}^{s,W} \end{array} \right. , \quad (45)$$

где W – индекс системы GPS (G), ГЛОНАСС (R), Galileo (E), BeiDou (C);

$b_{P_{IF}}^{s,W}$ – дифференциальные кодовые задержки;

$ISB_r^G = 0, ISB_r^Y = dt_r^Y - dt_r^G, Y = R, E, C$ – межсистемное смещение (Inter-System Bias – ISB).

Реализованная модификация алгоритма учета ДКЗ в уравнениях измерений метода PPP в реальном времени заметно сокращает время сходимости решения в статическом режиме, это подтверждается проведенными экспериментами по оценке точности и сокращению времени сходимости решения, результаты которых представлены в 3.1.1, а также в статье [6].

2.3 Реализация методики коллаборативного позиционирования объектов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем

В реализации методики КП предложено использовать метод PPP в качестве основного, а поправки RTK от пользователя к пользователю – по запросу для быстрой инициализации или повторной инициализации фильтра Калмана метода PPP. Способ передачи поправок к НАП в ПСС для метода PPP на несколько порядков эффективнее, чем передача дифференциальных поправок в ППН, из чего следует, что использование метода PPP позволит снизить нагрузку на телекоммуникационные каналы связи. В количественном отношении, согласно исследованиям [69, 97], для 100 единиц устройств, наблюдающих 12 спутников и выполняющих позиционирование в ПСС, объем передаваемой информации составит $1\,500 \text{ бит/с} \cdot 100 = 150\,000 \text{ бит/с} = 150 \text{ Кбит/с}$, а для поль-

зователей, выполняющих позиционирование в ПСН при реализации методики VRS, самой экономичной с точки зрения объема передачи данных, объем передаваемой информации составит $4\,800 \text{ бит/с} \cdot 100 = 480\,000 \text{ бит/с} = 480 \text{ Кбит/с}$, при RS+FKR $480 \text{ Кбит/с} \cdot 100 = 48 \text{ Мбит/с}$, что значительно больше, чем при передаче поправок в ПСС.

Реализация коллаборативного позиционирования предполагает изменение способа взаимодействия ГНСС-приемников друг с другом. Таким образом, «Базовая станция» и «Мобильная станция» [1, 2] рассматриваются не как постоянные типы приемников, а как текущая роль или статус приемника. Помимо них добавлен новый статус – «Кандидат». Рассматривается следующая схема взаимодействия между ними.

«Мобильная станция» – статус по умолчанию. Он присваивается НАП сразу после ее включения или когда точность ее определения местоположения низкая или неизвестна. Получив этот статус, «Мобильная станция» отправляет свои приближенные координаты и запрос на RTK-коррекцию в облачный дата-центр (ОДЦ).

Статус «Кандидат» присваивается НАП, если стандартное отклонение его координат ниже определенного уровня (20 см для целей тестирования), и если пользователь дал согласие на передачу высокоточных координат другим пользователям.

Статус «Базовая станция» присваивается кандидату через ОДЦ, если поблизости есть какая-либо «Мобильная станция», требующая коррекции. База передает поток поправок ППН-измерений и высокоточные координаты в формате RTCM3 на «Мобильную станцию» через ОДЦ.

Уточнение местоположения пользователя осуществляется путем частичной замены априорной информации в расширенном фильтре Калмана метода PPP, значениями, полученными из RTK-решения в реальном времени.

Схема взаимодействия пользователей НАП и ОДЦ в рамках концепции КП представлена на рисунке 9 в виде прототипа сервиса коллаборативного позиционирования.

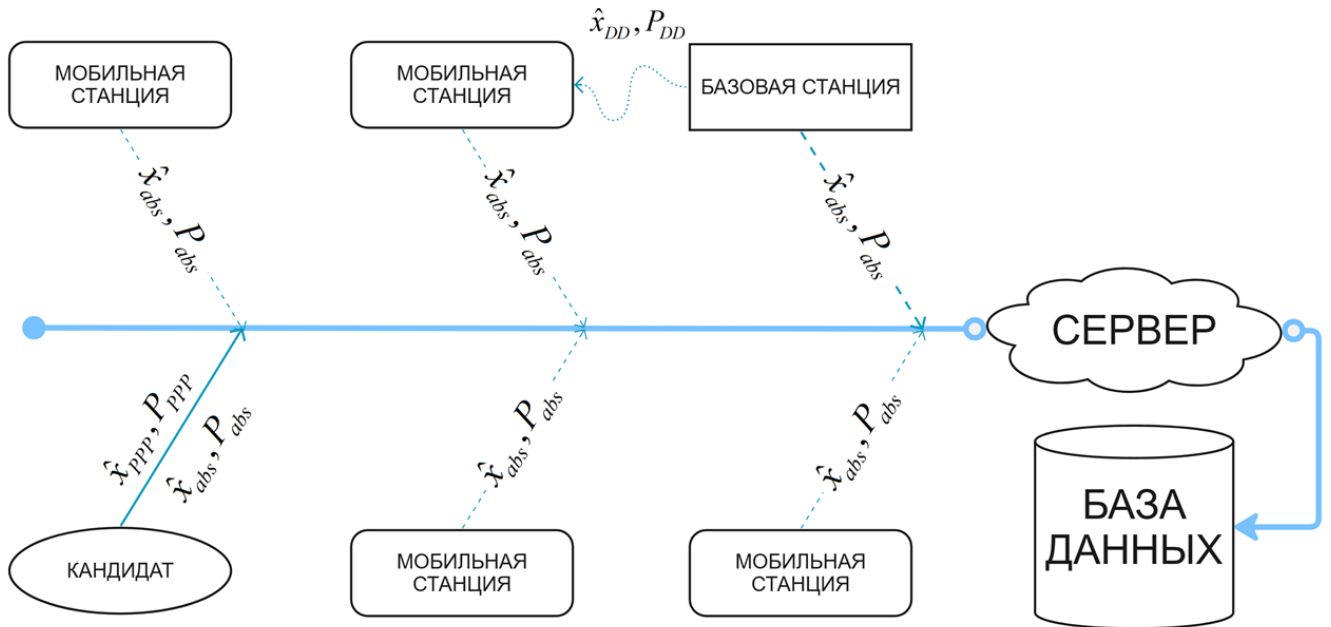


Рисунок 9 – Схема взаимодействия пользователей НАП и ОДЦ

Предложенная схема сервиса коллаборативного позиционирования была реализована в виде прототипа на языке программирования Python. Для обеспечения масштабируемости и надежности сервиса была выбрана реализация платформы как услуги (PaaS). ОДЦ в форме PaaS позволяет развернуть систему на разных виртуальных машинах в рамках одного приложения, работающего в одном облачном сервисе. Доступ пользователей обеспечивается через выделенный общедоступный IP-адрес. Выполняется автоматическая балансировка нагрузки. Облачная платформа масштабируема. Виртуальные машины развертываются таким образом, чтобы исключить единую точку отказа. База данных ОДЦ содержит информацию о состоянии НАП, координатах в ITRF, их стандартных отклонениях, кинематическом состоянии (непо-

движный или в движении) и типе приемника. Пример архитектуры базы данных представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Архитектура базы данных

id	ГНСС-статус	Приближенные координаты	Кинематическое состояние	СКО (для «Кандидата»)	Тип устройства
1	МБ	X: 4627851 Y: 119640 Z: 4372993	В движении		Смартфон
2	К	X: 4627824 Y: 119639 Z: 4372963	В движении	X: 0.12 Y: 0.09 Z: 0.15	Автомобиль с ГНСС
3	БС	X: 4627811 Y: 119640 Z: 4372998	Неподвижен		ПДБС

Предложенная схема и правила взаимодействия пользователей позволяют реализовать методику коллаборативного позиционирования в максимальном приближении к изложенной в работе [68] концепции, а также решить задачи, поставленные в диссертационном исследовании.

Решение о том, требуется ли НАП коррекция RTK для (ре)инициализации фильтра Калмана в методе PPP, принимается в соответствии со следующими критериями, при условии, что «Базовая станция» неподвижна:

- 1) решение PPP не сошлось (приблизилось к высшему уровню точности);
- 2) доступная альтернатива (решение RTK) значительно точнее решения PPP.

Первый критерий основан на эмпирическом наблюдении, что в кинематическом режиме метода PPP стандартное отклонение каждой координаты в конечном итоге сходится до уровня в несколько сантиметров и после этого существенно не меняется. Для этого скорость уменьшения стандартного отклонения сравнивается с эмпирическим значением $L = 0,02$ для интервала выборки данных в 1 секунду, согласно:

$$\frac{|SMA_{m_t} - \bar{\sigma}_{PPP_t}|}{SMA_{m_t}} > L, \quad (46)$$

где SMA_{m_t} – простое скользящее среднее с шириной выборки m на момент времени t :

$$SMA_{m_t} = \frac{1}{m} \sum_{i=n-m+1}^n \bar{\sigma}_{PPP_i};$$

$\bar{\sigma}_{PPP_t}$ – среднее стандартное отклонение метода PPP на момент времени t :

$$\bar{\sigma}_{PPP_t} = \frac{\sigma_X + \sigma_Y + \sigma_Z}{3}.$$

Если результат условия (46) выполнен, считается, что решение PPP не сошлось. Затем у наиболее подходящего кандидата запрашиваются ПСН-поправки, превращая его в базу, чтобы рассчитать решение RTK для «Мобильной станции» в качестве альтернативы решению PPP.

Поправки ПСН от «Базовой станции» включают ГНСС-измерения и высокоточные координаты в формате RTCM3, которые используются для относительного позиционирования в реальном времени на основе модели фазовых измерений двойных разностей фаз несущей (DD): обычный RTK, если базой является пункт ПДБС, или в режиме движущейся базовой линии, если база движется. В любом случае ожидается, что

координаты или траектория движения базы в реальном времени будут очень точными. В обоих случаях далее полученное решение называется RTK решением.

Второй критерий используется для проверки того, является ли решение RTK более точным, чем ранее полученное решение PPP:

$$\bar{\sigma}_{PPP_t} > \bar{\sigma}_{DD_t}, \quad (47)$$

где $\bar{\sigma}_{DD_t}$ – среднее стандартное отклонение на момент времени t для относительного

метода
$$\bar{\sigma}_{DD_t} = \frac{\sigma_X + \sigma_Y + \sigma_Z}{3}.$$

Пример работы алгоритма методики коллаборативного позиционирования представлен на рисунке 10.

Для случая, когда НАП в статусе «Базовая станция» находится в движении, выполняется реализация режима «Подвижная базовая линия». В таком случае координаты НАП в статусе «Базовая станция» определяются на каждый момент времени посредством реализации метода PPP в кинематическом режиме. При определении координат «Мобильной станции» в таком режиме может возникнуть преждевременное срабатывание алгоритма (ре)инициализации фильтра Калмана в силу того, что оценки координат, полученные из относительного метода в режиме «Подвижная базовая линия», могут отличаться от координат, полученных на МС методом PPP в кинематическом режиме до метра по каждой из координат, а их стандартные отклонения – находиться на уровне первых дециметров. Такой эффект возникает из-за того, что решение, получаемое на БС методом PPP в кинематическом режиме, может еще не сойтись или же по оценке первого критерия не измениться быстро.

$$\begin{aligned}
 x_{DD-MB} - x_{PPP} &> 3\sqrt{\sigma_{x_{DD-MB}}^2 + \sigma_{x_{PPP}}^2} \\
 y_{DD-MB} - y_{PPP} &> 3\sqrt{\sigma_{y_{DD-MB}}^2 + \sigma_{y_{PPP}}^2} \\
 z_{DD-MB} - z_{PPP} &> 3\sqrt{\sigma_{z_{DD-MB}}^2 + \sigma_{z_{PPP}}^2}
 \end{aligned}
 \quad (48)$$

В таком случае алгоритм методики коллаборативного позиционирования будет выглядеть следующим образом (рисунок 11).

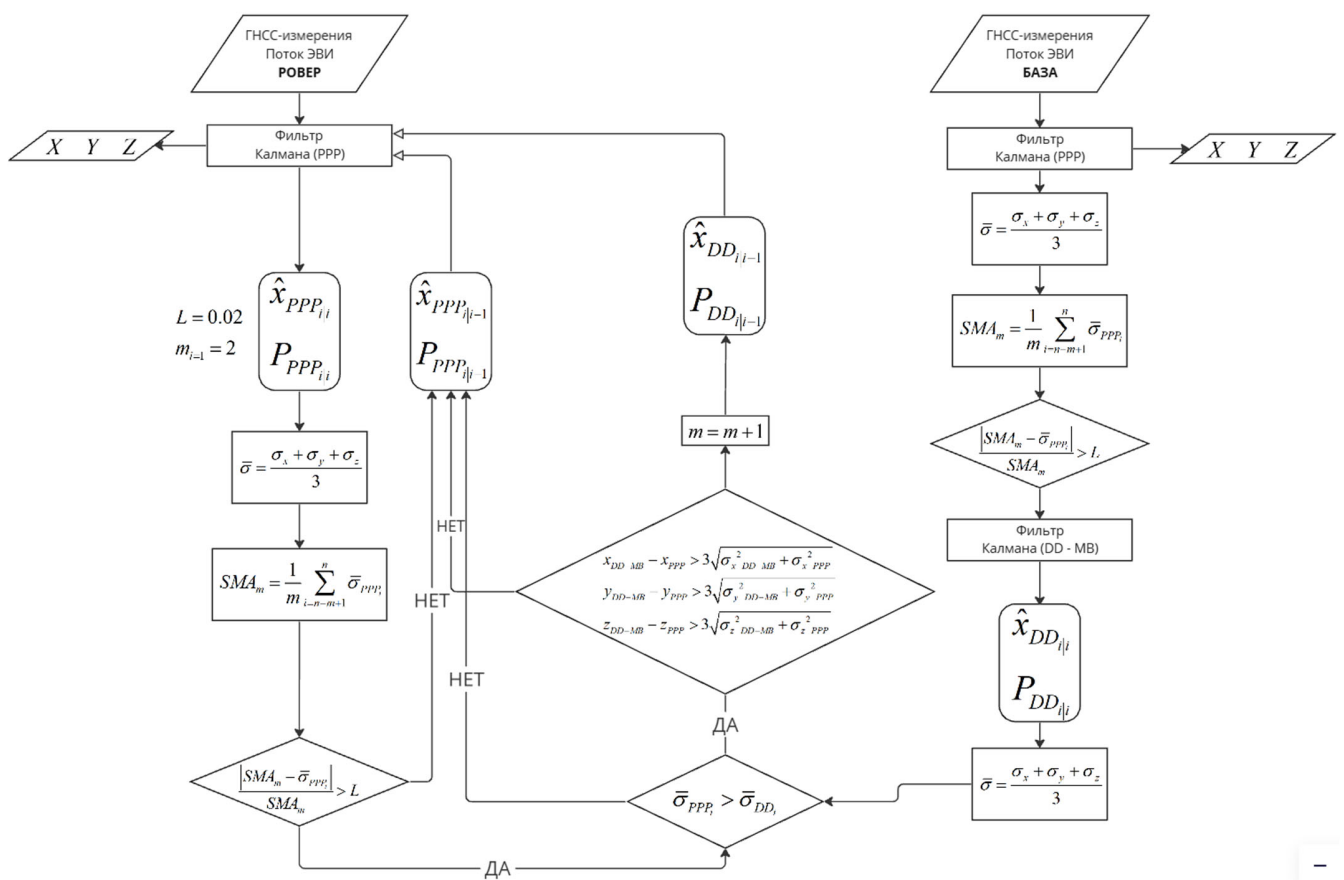


Рисунок 11 – Алгоритм методики коллаборативного позиционирования для подвижной базовой линии

При соблюдении всех критериев решение PPP пересчитывается следующим образом. Априорные координаты и их дисперсии на этапе прогнозирования для текущего момента t заменяются значениями из решения RTK, после чего этап обновления

измерений PPP пересчитывается. Это позволяет приблизить оценки координат метода PPP к RTK решению в момент времени t и, что более важно, способствует увеличению веса текущих оценок фазовых неоднозначностей и влажной тропосферной задержки, что позволяет решению в методе PPP сойтись быстрее и стать устойчивым.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ КОЛЛАБОРАТИВНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПО СИГНАЛАМ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

3.1 Постановка экспериментов

Для подтверждения эффективности учета ДКЗ в методе PPP в реальном времени был проведен эксперимент по оценке точности и времени сходимости решения в методе PPP при многосистемных ГНСС-измерениях с учетом ДКЗ в реальном времени. На протяжении суток выполнялось позиционирование пунктов в статическом и кинематическом режиме в реальном времени методом PPP: координаты неподвижного пункта уточнялись по мере поступления измерений. Для решений в статическом и кинематическом режимах использовались данные на разных интервалах времени.

Для оценки эффективности методики коллаборативного позиционирования были проведены предварительные псевдокинематические и кинематические испытания. Решения RTK, PPP и коллаборативного позиционирования вычислялись одновременно в реальном времени, а затем сравнивались.

3.2 Эксперимент по оценке точности и времени сходимости решения в методе PPP с учетом ДКЗ в реальном времени

В целях автоматизации эксперимента была использована консольная версия программы «rtknavi» под названием «rtkrvcv» из набора программной библиотеки с открытым исходным кодом для стандартного и высокоточного позиционирования с помощью ГНСС RTKLIB [77]. Так как компоненты библиотеки RTKLIB не были подготовлены к использованию ДКЗ, была выполнена модификация исход-

ного кода для реализации многосистемных ГНСС-измерений методом PPP в реальном времени. Были внесены следующие изменения:

- 1) чтение данных из файлов ДКЗ в версии формата Bias SINEX (BSX);
- 2) модифицирован алгоритм для выполнения мультисистемных ГНСС-измерений с помощью ДКЗ как из потока SSR-поправок, так и из BSX-файла.

Модификация позволяет за счет применения потока ПСС-поправок или BSX файлов исключить влияние ДКЗ в многосистемных измерениях с использованием GPS, ГЛОНАСС и Galileo. Исходный код программы находится в онлайн-репозитории [20].

В эксперименте использовались данные сети станций, развернутой в рамках инициативы MGEX IGS [64, 12]. Станции этой сети принимают сигналы всех доступных глобальных и региональных навигационных спутниковых систем, включая последнее поколение спутников GPS, ГЛОНАСС, BeiDou, Galileo, QZSS и NAVIC и любых дифференциальных спутниковых дополнений, рисунок 12.



Рисунок 12 – Карта расположения пунктов системы IGS Multi-GNSS (MGEX), используемых в эксперименте (синий – IGS, красный – EUREF)

В таблице 7 представлены задействованные станции, приемники и принимаемые ими сигналы, запись измерений происходила с частотой 1 Гц.

Таблица 7 – Наименование пунктов, участвующих в эксперименте, и принимаемые ими сигналы

№	Сеть	Название станции	Приемник	GPS	ГЛОНАСС	Galileo
1	IGS	ABMF	SEPT POLARX5	1C,2W,5Q	1C,2P	1C,7Q,5Q,6C,8Q
2	IGS	ALGO	SEPT POLARX5	1C,2W,5Q	1C,2P	1C,7Q,5Q,6C,8Q
3	IGS	NRC1	JAVAD TRE_G3TH DELTA	1C,2W,5X	1C,2P	1X,7X,5X
4	IGS	LMMF	TRIMBLE ALLOY	1C,2W,5X	1C,2P	1X,7X,5X,6X,8X
5	IGS	POVE	TRIMBLE NETR9	1C,2W,5X	1C,2P	1X,7X,5X,8X
6	IGS	SALU	TRIMBLE NETR9	1C,2W,5X	1C,2P	1X,7X,5X,8X
7	IGS	SAMO	TRIMBLE NETR9	1C,2W,5X	1C,2P	1X,7X,5X,8X
8	EUREF	HELG	JAVAD TRE_3 DELTA	1C,2W,5X	1C,2P	1X,7X,5X
9	EUREF	TERS	SEPT POLARX5	1C,2W,5Q	1C,2P	1C,7Q,5Q,6C,8Q

Окончание таблицы 7

№	Сеть	Название станции	Приемник	GPS	ГЛОНАСС	Galileo
10	EUREF	ZIM2	TRIMBLE NETR9	1C,2W,5X	1C,2P	1X,7X,5X,8X
11	EUREF	WSRT	SEPT POLARX5	1C,2W,5Q	1C,2P	1C,7Q,5Q,6C,8Q
12	EUREF	KARL	JAVAD TRE_3 DELTA	1C,2W,5X	1C,2P	1X,7X,5X

При отсутствии искусственных ограничений на угловые высоты видимых спутников количество используемых спутников в течение суток варьировалось от 17 до 29 (GPS, ГЛОНАСС, Galileo), а значения горизонтального и вертикального геометрических факторов HDOP и VDOP составили от 0,46 до 0,79 и 0,7 до 1,39 соответственно [87].

При реализации метода PPP в режиме реального времени использовался SSR-поток [98], включающий в себя ДКЗ. Таким образом, потребителю поступают актуальные ДКЗ в реальном времени. В таблице 8 представлены наименования оцениваемых ДКЗ для каждой ГНСС.

Таблица 8 – Наименования дифференциальных кодовых задержек сигналов ГНСС, передаваемые потоком SSRA00CNE1

ГНСС	ДКЗ
GPS	C1C, C1P, C1W, C2S, C2L, C2W, C5Q
ГЛОНАСС	C1C, C1P, C2C, C2P
Galileo	C1C, C5Q, C7Q, C6C

Окончание таблицы 8

ГНСС	ДКЗ
BeiDou-2	C2I, C6I, C7I
BeiDou-3	C1P, C2I, C5P, C6I

В результате обработки измерений вычислялись средние значения погрешностей и среднеквадратические ошибки оценок координат:

$$\text{среднее}_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \Delta_{i,j}}{n_j}, \quad (49)$$

$$CKO_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} \Delta_{i,j}^2}{n_j}}, \quad (50)$$

где $j = 0, 1, 2, \dots$ – момент времени;

$i = 1, \dots, n_j$ – порядковый номер станции;

$\Delta_{i,j}$ – разность между эталонными и вычисленными координатами станции.

Оценки получены синхронно с помощью исходной и модифицированной версии алгоритма по одним и тем же измерениям. Эталонные координаты по каталогу ITRF2014 [85] на дату получения измерений. Погрешности координат пересчитывались на географические оси для эллипсоида GRS80: северную N, восточную E и вертикальную U.

На рисунках 13–15 приведены средние значения ошибок по осям E, N, U для маски углов возвышения спутников в 10 градусов в статическом и кинематическом

режимах. Результаты представлены для интервала времени 600–86 400 с, отсчитываемого от начала решения (0 на горизонтальной оси соответствует 600 с от начала решения). Из графиков видно, что добавление в систему уравнений (46) ДКЗ позволило сократить время сходимости решения.

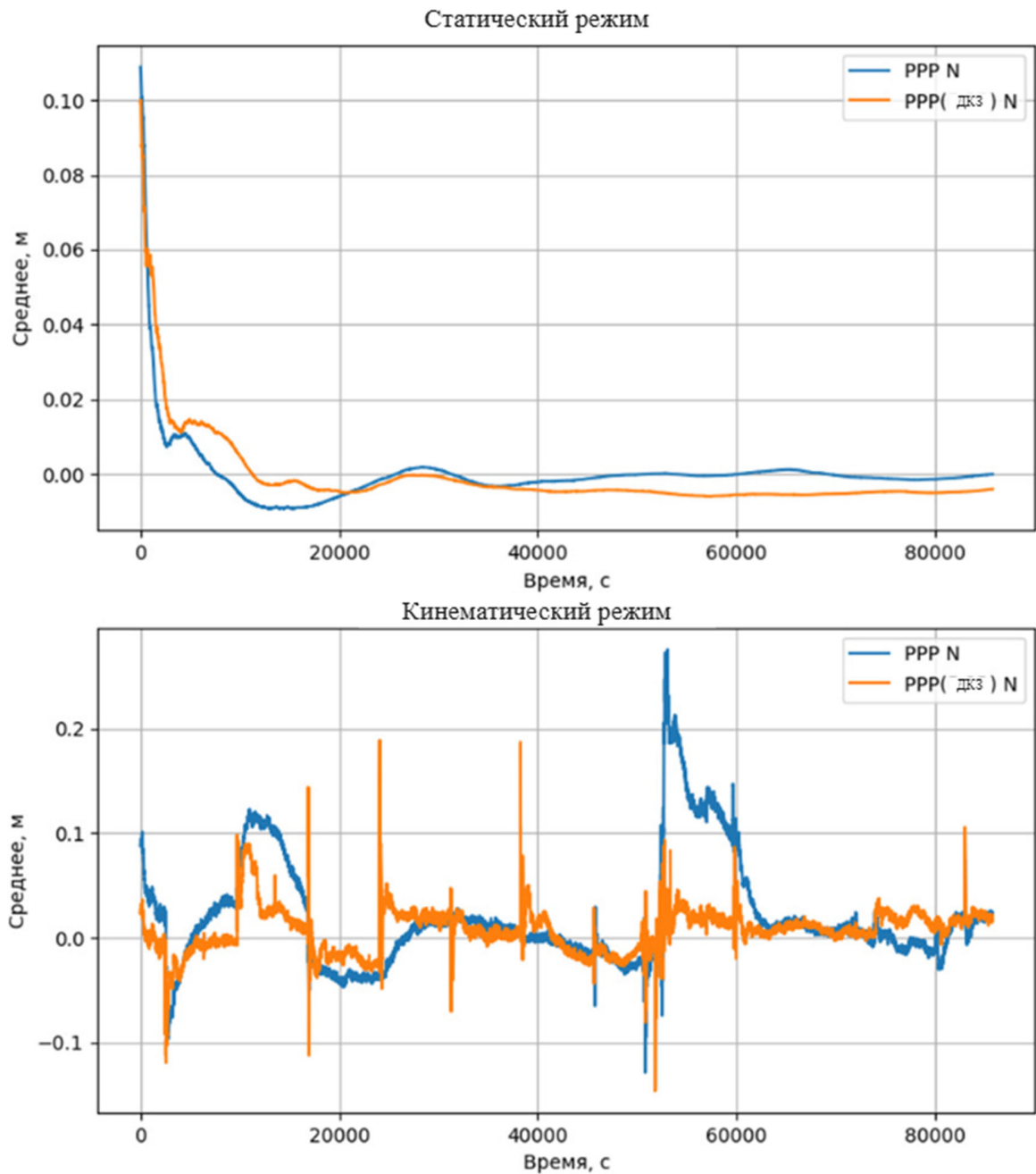


Рисунок 13 – Среднее значение погрешности по оси N

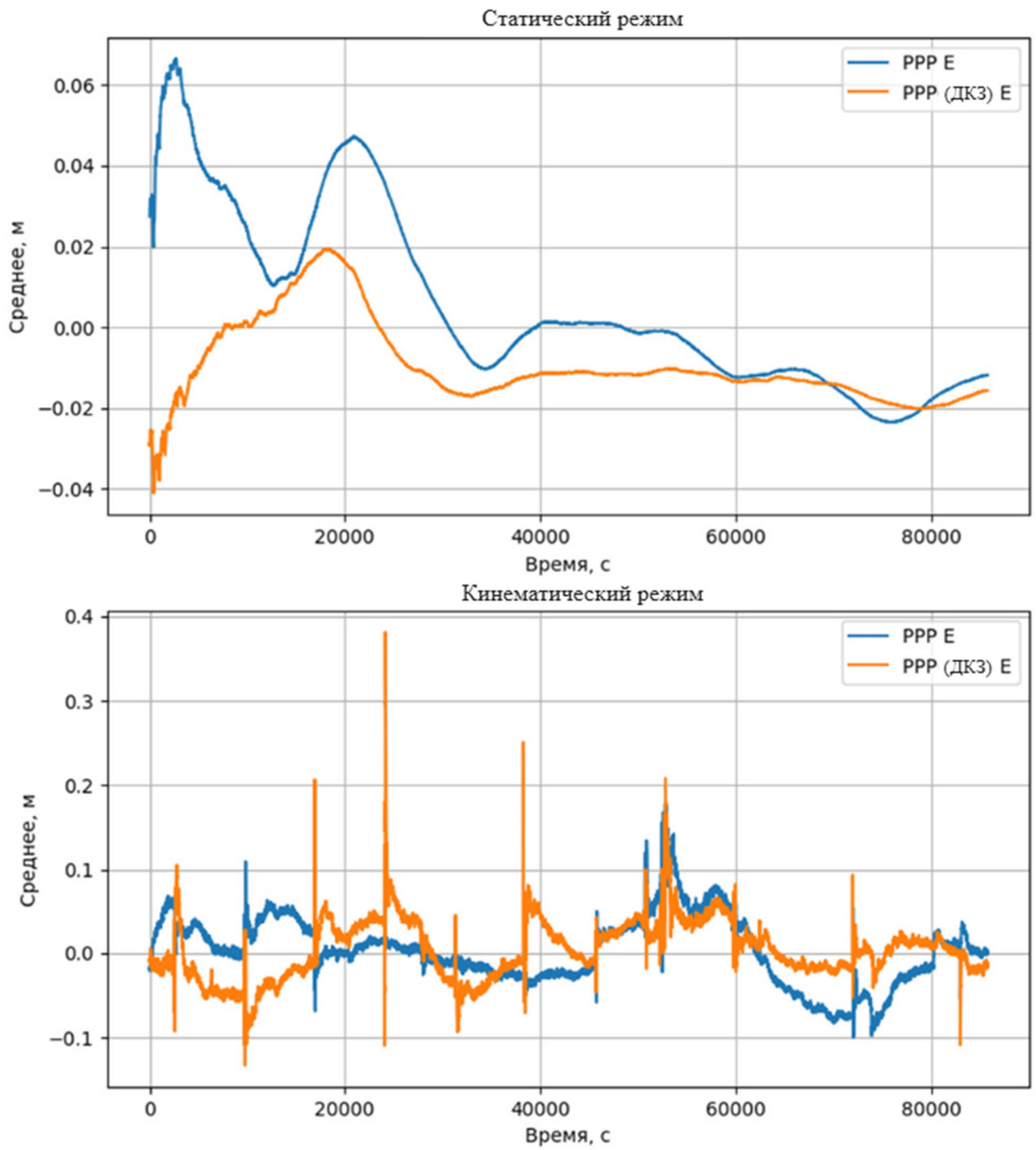


Рисунок 14 – Среднее значение погрешности по оси E

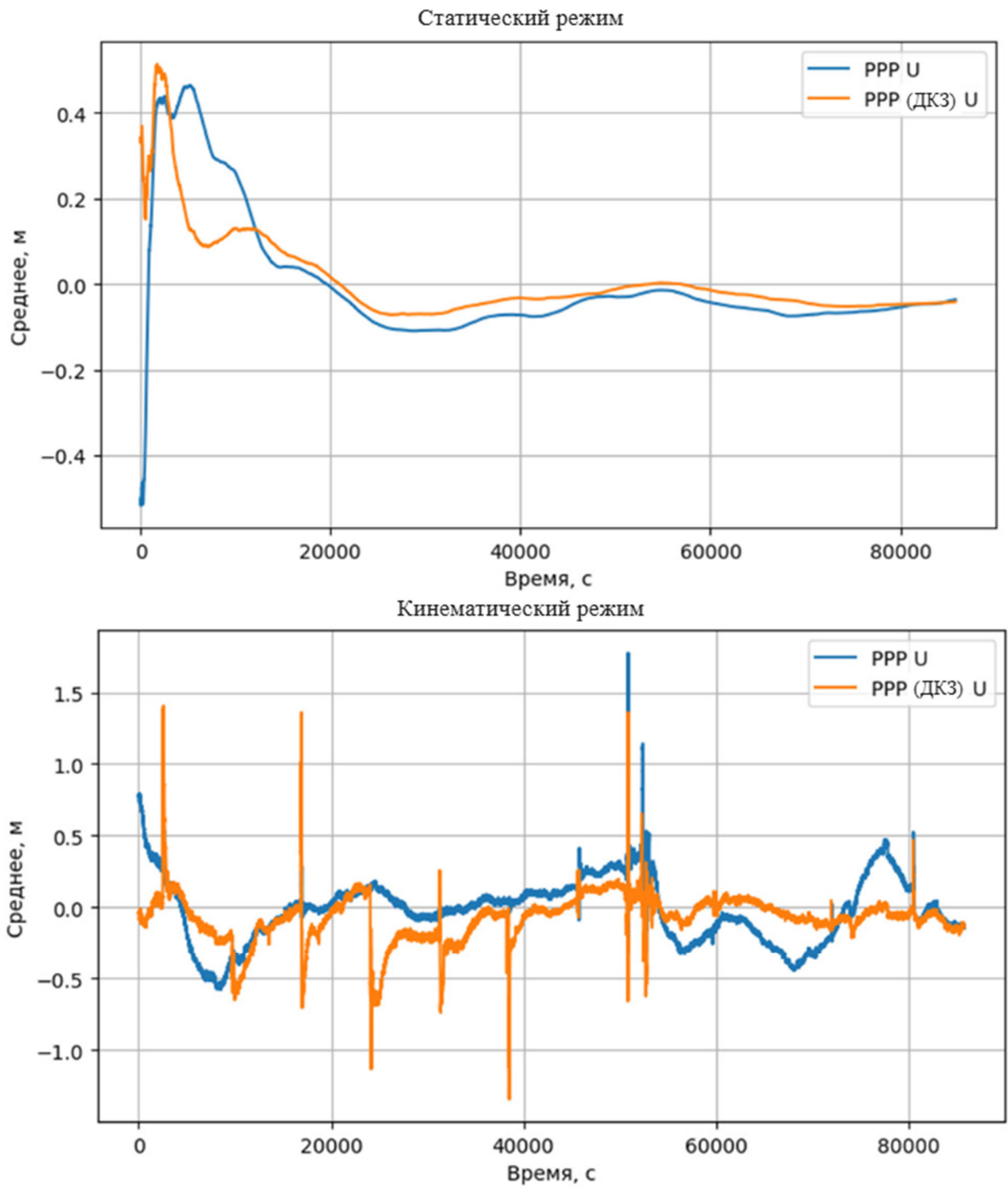


Рисунок 15 – Среднее значение погрешности по оси U

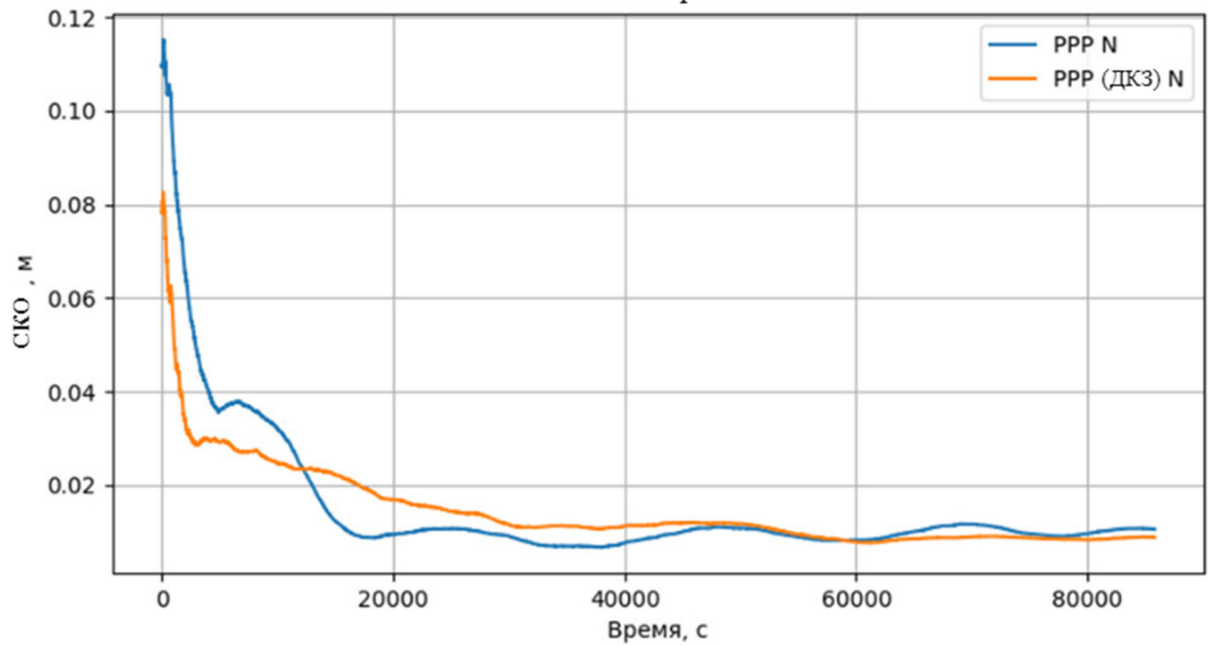
В статическом режиме время сходимости PPP-решения до СКО < 10 см для геодезической высоты слабо зависит от учета ДКЗ. Хотя СКО геодезической высоты с учетом ДКЗ после 600 с от начала решения уменьшается быстрее. Для горизонтальных координат время сходимости до СКО < 10 см с учетом ДКЗ составляет 4 мин, а без учета ДКЗ – 27 мин.

В кинематическом режиме время сходимости PPP-решения до СКО < 10 см с учетом ДКЗ по всем координатам составило 18 часов, без учета ДКЗ это условие не выполняется. Для горизонтальных координат время сходимости решения до СКО < 10 см с учетом ДКЗ заняло 13 минут, без учета ДКЗ – 40 минут. Аналогично на рисунках 16–18 приведены СКО по осям E, N, U для маски углов возвышения спутников в 10 градусов в статическом и кинематическом режимах.

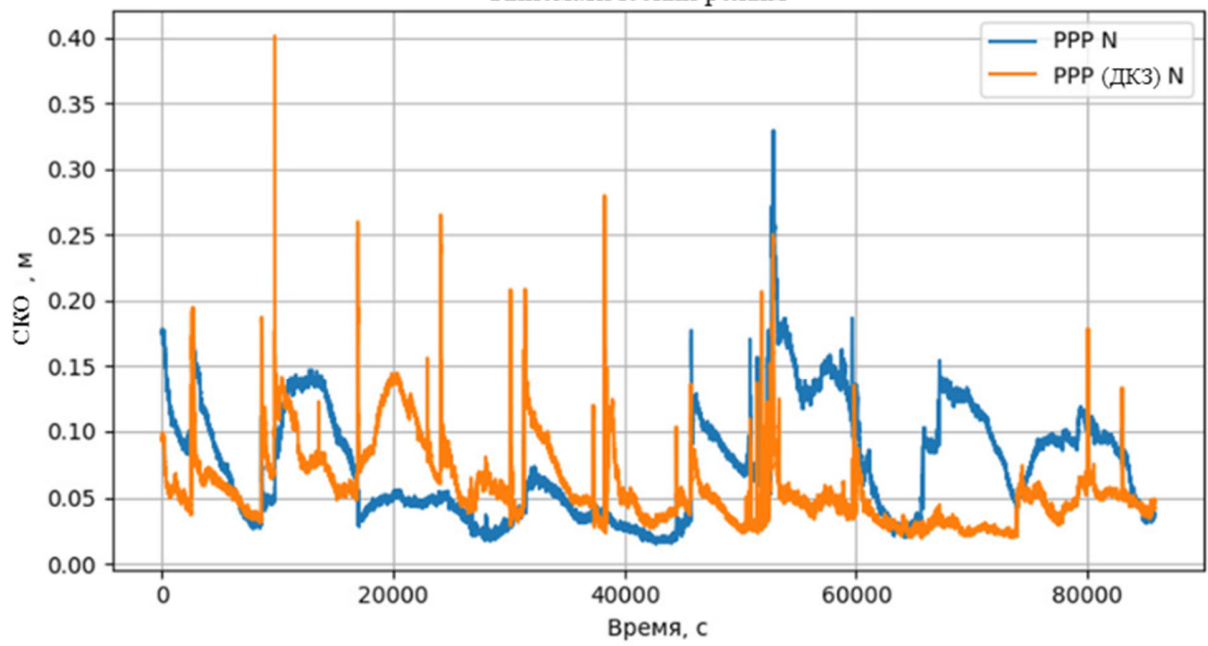
В этом режиме эффект от учета ДКЗ во многом нивелируется переходными процессами, связанными с оцениванием новых фазовых неоднозначностей.

Так же были определены СКО решений без учета и с учетом ДКЗ на суточном интервале при маске углов восхождения 10, 25, 40 градусов. Первые 10 минут решения (переходный процесс) не учитывались. При маске углов восхождения 40 градусов количество используемых спутников находится в диапазоне от 5 до 13 спутников, HDOP от 1,25 до 12,79, VDOP от 2,41 до 19,25. Значения СКО представлены в таблице 9.

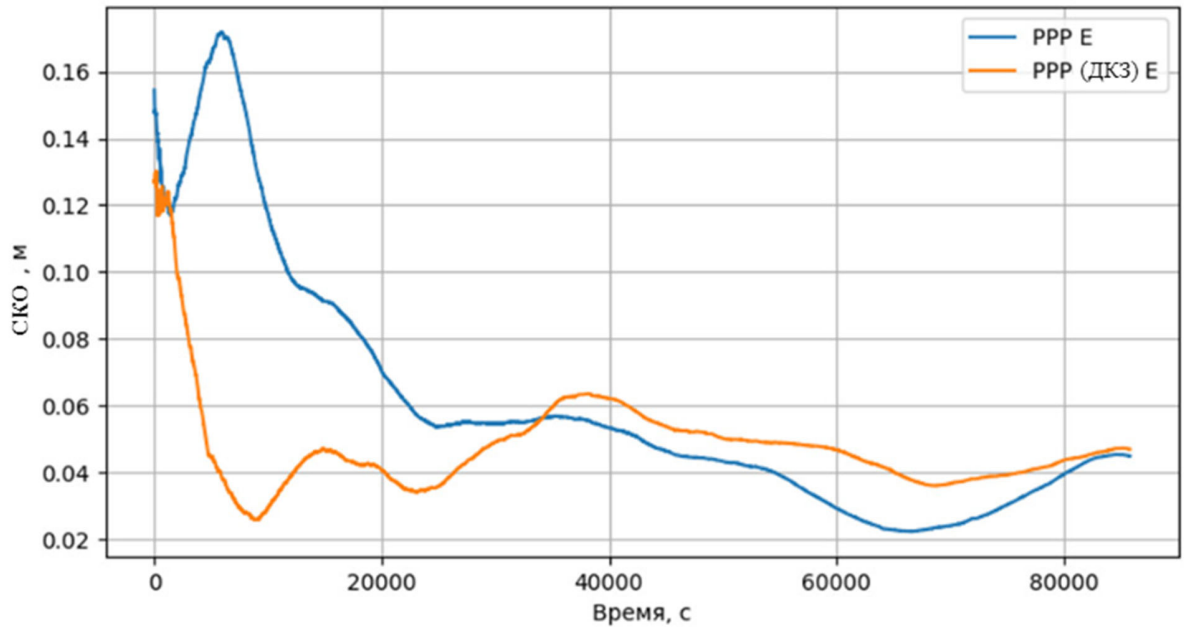
Статический режим



Кинематический режим

Рисунок 16 – СКО по оси N

Статический режим



Кинематический режим

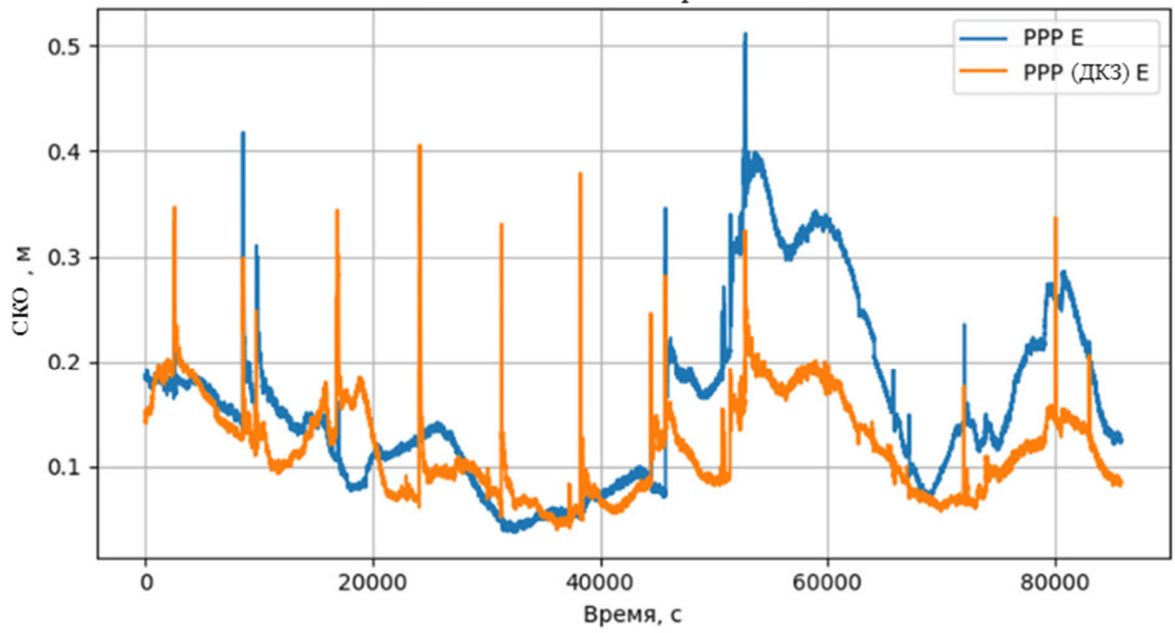
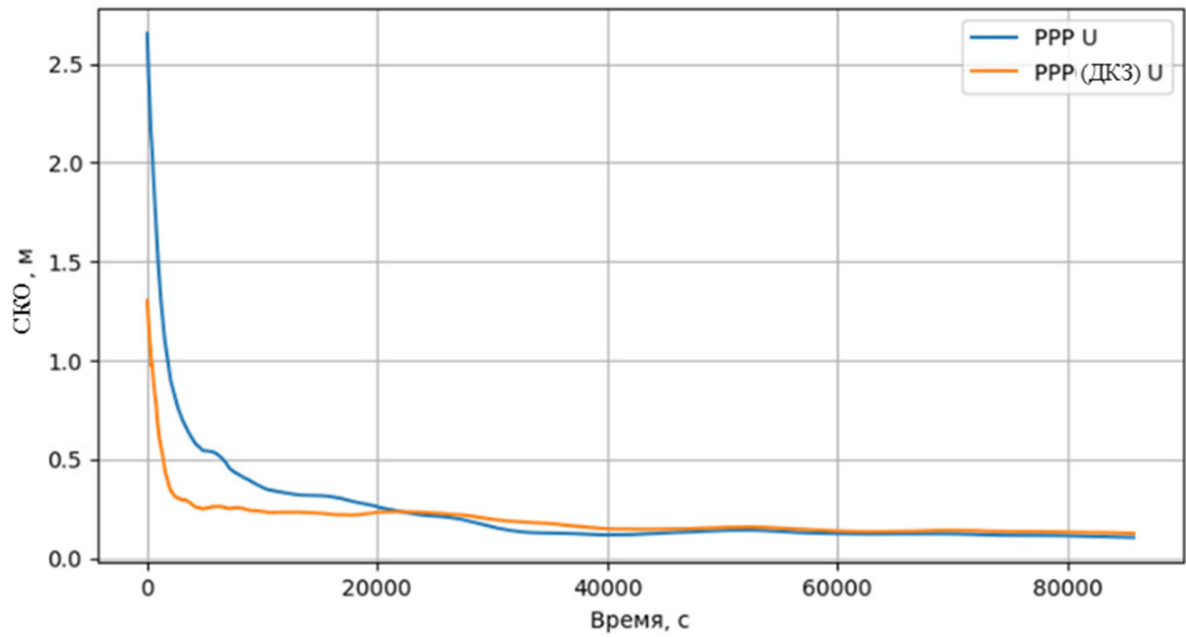


Рисунок 17 – СКО по оси E

Статический режим



Кинематический режим

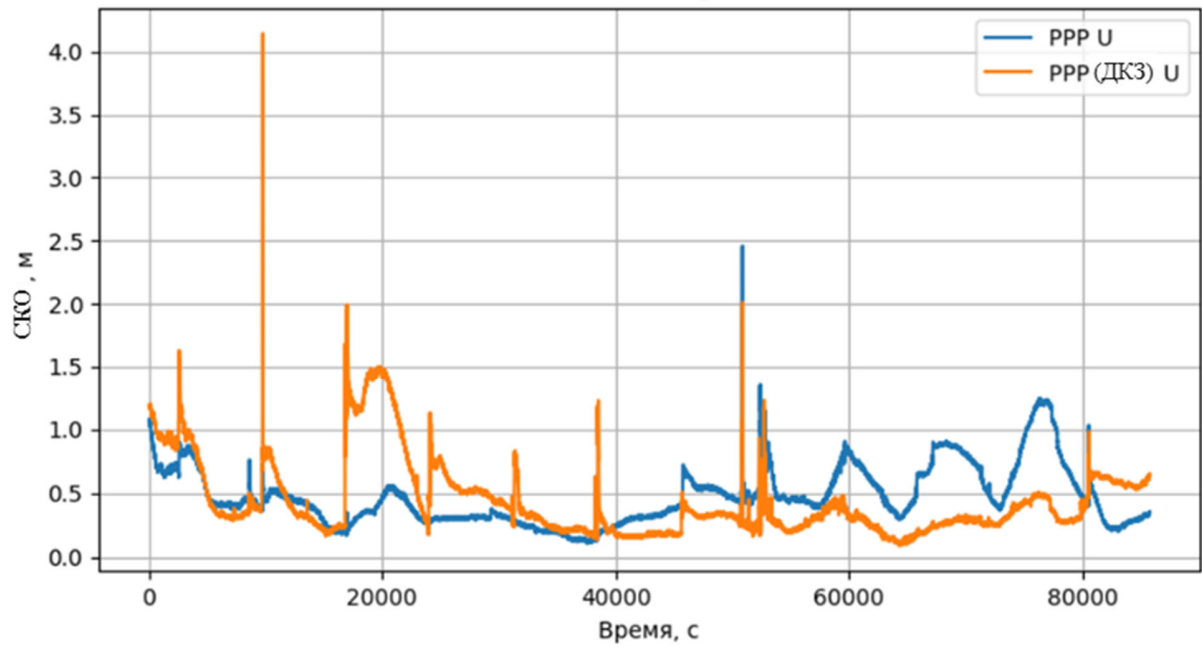
Рисунок 18 – СКО по оси U

Таблица 9 – СКО без учета ДКЗ / СКО с учетом ДКЗ / при ограниченной видимости спутников, м

Режим		Статика			Кинематика		
Маска углов восх., градусы		10	25	40	10	25	40
Координаты	E	0,22 / 0,20	0,29 / 0,26	0,35 / 0,22	0,37 / 0,31	0,27 / 0,24	1,31 / 0,73
	N	0,11 / 0,11	0,14 / 0,12	0,14 / 0,11	0,25 / 0,22	0,23 / 0,2	1,1 / 0,69
	U	0,44 / 0,4	0,49 / 0,44	0,71 / 0,59	0,63 / 0,61	0,58 / 0,51	3,36 / 2,16

Видно, что эффективность применения ДКЗ выше для более стесненных условий видимости спутников. Особенно эффект заметен для маски возвышения в 40° в режиме «Кинематика». В этом случае СКО горизонтальных координат, полученных с учетом ДКЗ, на 0,5 м меньше, чем без учета ДКЗ. Тогда как СКО вертикальной координаты с учетом ДКЗ оказывается меньше на 1,2 м. По мере ухудшения видимости спутников эффект от применения ДКЗ в статическом и кинематическом режимах повышается.

3.3 Псевдокинематические эксперименты

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. Схема расположения станций представлена на рисунке 19.

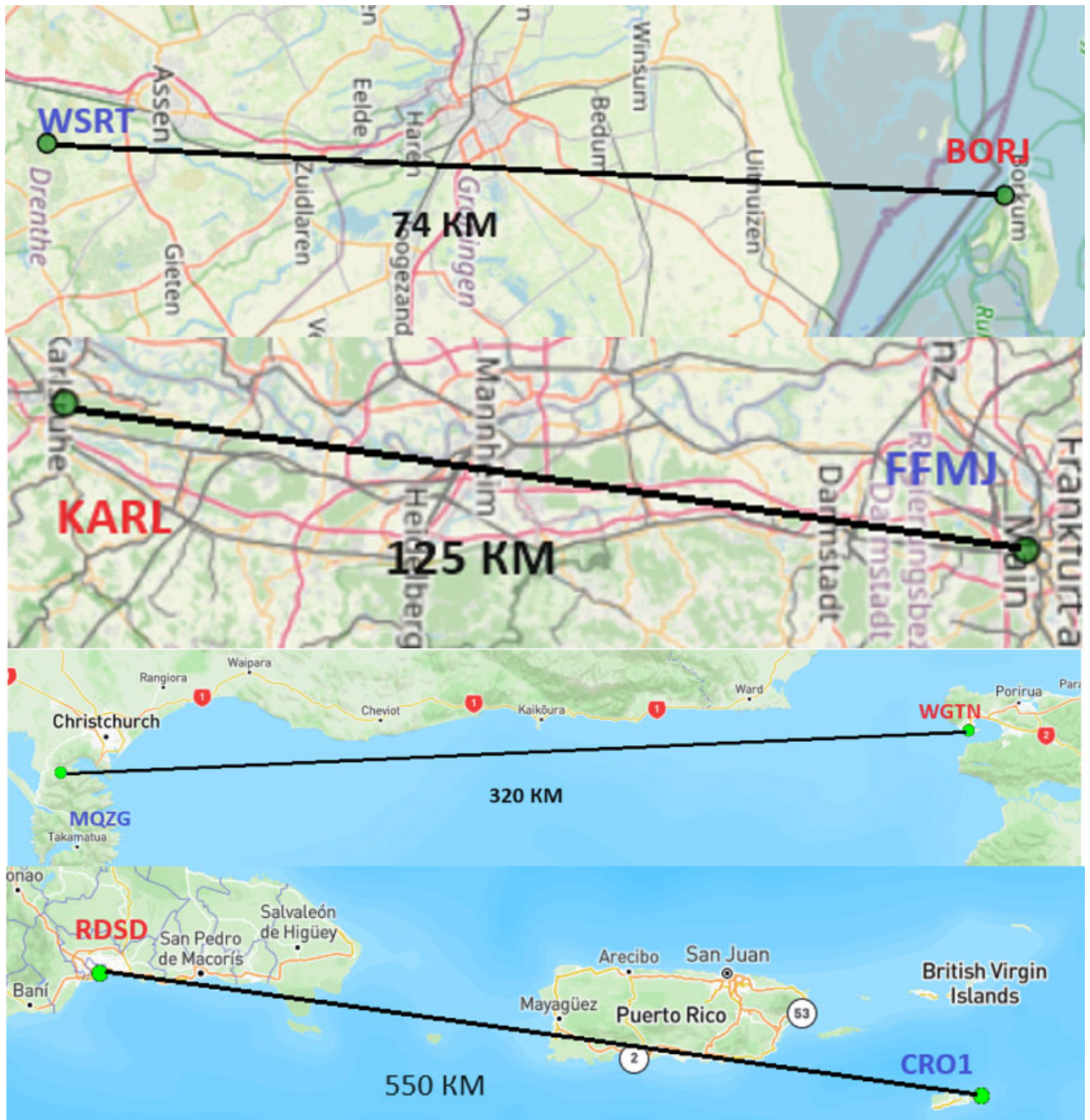


Рисунок 19 – Схема расположения пунктов МГС и ПРСОЕ

В таблице 10 представлены типы приемников и антенн пункта для каждой станции.

Таблица 10 – Аппаратура, используемая на пунктах МГС и ПРСОЕ

Сеть	Пункт	Приемник	Антенна
ПРСОЕ	WSRT	SEPT POLARX5	LEIAR25.R4
	BORJ	JAVAD TRE_3 DELTA	LEIAR25.R4
	KARL		LEIAR25.R3
	FFMJ		
МГС	WGTT	TRIMBLE ALLOY	TRM115000
	MQZG		
	CRO1	SEPT POLARX5	JAVRINGANT
	RDSO	TRIMBLE NETR9	TRM59800

В течение недельной измерительной кампании было получено 42 временных ряда оценок координат мобильной станции для каждой пары «Мобильная – Базовая станция» каждым из методов. Каждый временной ряд имел 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, RTK и методики КП в псевдокинематическом режиме. В таблице 11 приведены результаты средних значений СКО за недельную измерительную кампанию по каждой из координат, для каждого НИП, вычисленные по формуле Гаусса (29):

$$m = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}}, \quad (51)$$

где n – количество измерений;

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

Таблица 11 – Средние значения СКО за недельную измерительную кампанию

Метод	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

По результатам псевдокинематических экспериментов можно отметить положительный эффект методики КП, который выражается в уменьшении СКО в сравнении с методами PPP и RTK, что говорит о повышении точности определения координат. Отмечено, что даже при достаточно большом расстоянии от «Кандидата» результаты обработки коротких сеансов измерений относительным методом в реальном времени, положительно влияют на результаты позиционирования в методике КП. По результатам оценки точности выявлено, что методика КП превосходит метод PPP в независимости от того, как далеко находился «Кандидат», а в сравнении с методом RTK преимущество по точности наблюдается, когда «Кандидат» или «Базовая станция» находятся дальше, чем 80 км. Разница в результатах СКО для метода КП и RTK при корот-

кой базовой линии составила порядка 30 % для плановых координат и 50 % для геодезической высоты, но при этом для реализации RTK требовалось передавать на «мобильную станцию» больше данных, чем в методике КП.

3.4 Кинематические эксперименты

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

На автомобиль устанавливалась двухчастотная антенна, модель Narxon НХ-СХ601А, в качестве приемника выступала микросхема u-Blox ZED F9P, которая поддерживает фазовые измерения для всех ГНСС. Микросхема u-Blox ZED F9P подключалась к ноутбуку, который выступал в роли бортового компьютера для подключения к прототипу сервису коллаборативного позиционирования. В роли «Кандидата» выступала базовая станция NSKN на крыше лабораторного корпуса Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ), координаты которой были известны на момент выполнения эксперимента. На пункте NSKN была установлена антенна Trimble Zephyr Geodetic 2 с приемником Trimble NET R5, который также был подключен к прототипу сервиса коллаборативного позиционирования и по запросу передавал измерения и высокоточные координаты в формате RTCM3 на «Мобильную станцию». На рисунке 20 представлена рабочая установка на крыше автомобиля, которая состоит из антенны «Мобильной станции» и приемника для построения эталонного трека.



Рисунок 20 – Экспериментальная установка на крыше автомобиля (слева – антенна «Мобильной станции»; справа – приемник Stonex S800A для построения эталонного трека)

Результат оценки точности в кинематическом эксперименте относительно эталонного трека представлен в таблице 12. Величины СКО по всем типам решения включают смещение на 15,7 см в горизонтальной плоскости между фазовыми центрами рабочей антенны ровера и антенны, использованной для получения эталонного решения. Исправлен вертикальный сдвиг.

Таблица 12 – 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

В процессе обработки измерений кинематического трека отмечен эффект мгновенного восстановления решения после выхода из-под препятствия. По ходу маршрута автомобиля встречались преграды в виде мостов (пешеходные, автомобильные и метромост), во всех случаях после выхода «мобильной станции» из-под преграды решение восстанавливалось раньше, чем решение, полученное методами RTK или PPP. На рисунке 21 представлены примеры восстановления решения в сравнении с эталонным треком, полученным из обработки измерений относительным методом.



Рисунок 21 – Кинематический трек (белые точки – методика коллаборативного позиционирования; зеленые точки – относительный метод)

По результатам кинематического эксперимента отмечено снижение СКО в сравнении с методом PPP в 2-3 раза по направлениям на север и запад, а в сравнении с методом RTK полученные СКО находятся на одном уровне, за исключением вертикальной составляющей.

3.5 Псевдокинематические испытания с подвижной базовой станцией

Для проверки сценария, при котором оба пользователя («Кандидат» и «Мобильная станция») могут быть подвижными, были проведены псевдокинематические испытания на пунктах BORJ и WSRT. В начале испытаний пункт WSRT первым начал выполнять позиционирование методом PPP в кинематическом режиме, спустя 20 минут, после приобретения статуса «Кандидат» пунктом WSRT, к прототипу сервиса коллаборативного позиционирования был подключен пункт BORJ в статусе «Мобильная станция». В ходе испытаний алгоритм инициализации фильтра Калмана использовал координаты и стандартные отклонения, полученные из решения относительного метода в режиме подвижной базовой линии, в котором координаты «Базовой станции» определялись и подставлялись для каждого момента времени из решения метода PPP в кинематическом режиме. На рисунке 22 представлены пункты, участвующие в испытаниях.



Рисунок 22 – Пункты, используемые в псевдокинематических испытаниях с подвижной базовой линией

По истечении четырех часов испытаний были получены СКО пункта BORJ методами PPP, RTK и методикой КП. Результаты оценки точности представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Оценка точности определения координат методами PPP, RTK и методикой КП в псевдокинематическом режиме с подвижной базовой линией пункта BORJ

Тип оценки точности	Методы		
	<i>Коллаборативное позиционирование</i>	<i>PPP</i>	<i>RTK</i>
СКО (68,27 %)	<i>E: 0,13</i> <i>N: 0,09</i> <i>U: 0,40</i>	<i>E: 0,16</i> <i>N: 0,19</i> <i>U: 0,64</i>	<i>E: 0,10</i> <i>N: 0,23</i> <i>U: 0,26</i>

В сравнении с результатами псевдокинематического эксперимента при неподвижном «Кандидате», в данном случае СКО заметно повышаются, но при этом остаются ниже, чем СКО, полученные для RTK и PPP, что говорит об эффективности методики по сравнению с существующими методами.

3.6 Выводы по методике коллаборативного позиционирования

Предложенная методика коллаборативного позиционирования объектов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем, позволила уменьшить СКО определения координат в сравнении с методами PPP и RTK, а также сократить время ГНСС-измерений, необходимое для достижения заданной точности. За счет применения метода PPP в кинематическом режиме как основного, удалось достичь снижения объема передаваемой корректирующей информации в сравнении с методом RTK, что в перспективе позволит использовать канал связи для передачи полезной информации, обеспечивая тем самым надежность системы позиционирования, и также немаловажно, что благодаря использованию метода PPP, становится возможным формирование совместной наземной динамической инфраструктуры высокоточного позиционирования. За счет алгоритма (ре)инициализации фильтра Калмана в методе PPP, удастся восстанавливать решение после прерывания сигнала с первой секунды после выхода из-под препятствия.

Методика КП продемонстрировала более высокую точность позиционирования в сравнении с методом PPP во всех экспериментах и по сравнению с методом RTK при расстоянии между мобильной и базовой станцией более 80 км, независимо от того, двигаются «Мобильная станция» или «Кандидат», или нет.

Одним из недостатков методики КП является необходимость установки на НАП дополнительного модуля в виде микрокомпьютера (бортового компьютера) для подключения устройства к сервису коллаборативного позиционирования, а также накладывается ограничение на используемую аппаратуру пользователя в виде обязательного использования двухчастотной антенны и фазовой ГНСС-микросхемы.

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 си-

стем, 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- БШВ – бортовая шкала времени навигационного космического аппарата;
- ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система;
- СФДК – спутниковое функциональное дополнение космического базирования;
- КП – коллаборативное позиционирование;
- МГС – Международная ГНСС-служба (International GNSS Service – IGS);
- НИП – наземный измерительный пункт;
- НКА – навигационный космический аппарат;
- СДКМ – Система дифференциальной коррекции и мониторинга;
- СКО – среднеквадратическая ошибка;
- ЭВИ – эфемеридно-временная информация;
- МФГ – Международная федерация геодезистов;
- МГС – Международная ГНСС-служба;
- ПСС – представление состояния системы;
- ППН – представление пространства наблюдений;
- ДКЗ – дифференциальные кодовые задержки;
- СФЦ – смещение фазового центра;
- ВФЦ – вариации фазового центра;
- СЛАУ – система линейных алгебраических уравнений;
- МНК – метод наименьших квадратов;
- РФК – расширенный фильтр Калмана;
- ДС – динамическая система;
- ИСЛК – ионосферно-свободная линейная комбинация;
- ВТЗ – влажная составляющая тропосферной задержки;
- ЦМКА – центр масс космического аппарата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 1 : монография / К. М. Антонович. – Москва : Картгеоцентр, 2005. – 334 с. – ISBN 5-86066-072-3. – Текст : непосредственный.

2 Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 2 : монография / К. М. Антонович. – Москва : Картгеоцентр, 2006. – 311 с. – ISBN 978-5-86066-077-9. – Текст : непосредственный.

3 Антонович, К. М. Совершенствование методики точного дифференциального позиционирования по результатам ГНСС-измерений (Precise Point Positioning) / К. М. Антонович, Л. А. Липатников. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4/С. – С. 44–47.

4 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.

5 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.

6 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.

7 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.

8 Липатников, Л. А. О методике точного дифференциального позиционирования (precise point positioning) и перспективах ее совершенствования / Л. А. Липатников. – Текст : // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : сб. молодых ученых СГГА (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 48–53.

9 Липатников, Л. А. Совершенствование методики точного дифференциального позиционирования с использованием глобальных навигационных спутниковых систем : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 22.00.32 / Липатников Леонид Алексеевич ; Сибирская государственная геодезическая академия. – Новосибирск : СГГА, 2014. – 114 с.

10 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».

11 Alam, N. Cooperative Positioning for Vehicular Networks: Facts and Future / N. Alam, A. G. Dempster – Текст : непосредственный // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2013. – Vol. 14, № 4. – P. 1708–1717.

12 Bahadur, B. Comparative analysis of MGEX products for post-processing multi-GNSS PPP / B. Bahadur, M. Nohutcu – Текст : непосредственный // Measurement. – 2019. – Vol. 145. – P. 361–369.

13 Banville, S. Satellite and receiver phase bias calibration for undifferenced ambiguity resolution / S. Banville // Proc. ION NTM. – 2008. – С. 711–719.

14 Brotzer, P. A GPS Moving Baseline Navigation System on a SAR DRONE Tested in an Experiment to Analyze the Signature of Covered Reflectors / P. Brotzer, D. Henke, S. Guillaume. – Текст : непосредственный // IGARSS 2022 – 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Kuala Lumpur, Malaysia : IEEE, 2022. – P. 4795–4798.

15 Collins, P. Undifferenced GPS Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing / P. Collins, S. Bisnath. – Текст : непосредственный // Navigation. – 2010. – Vol. 57, № 2. – P. 123–135.

16 Cranenbroek, J. van. Making profitable GNSS RTK network infrastructure / J. van Cranenbroek, V. Lui, R. Keenan. – Текст : непосредственный // Positioning. – 2006. – Vol. 1. – P. 0.

17 Dawidowicz, K. Impact of BeiDou Observations on the Accuracy of Multi-GNSS PPP in a Function of Observing Session Duration within Europe – Analysis Based on Open-Source Software GAMP / K. Dawidowicz, M. Bakula – Текст : непосредственный // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 15, № 1. – P. 158.

18 Denham, M. C. Choosing the number of factors in partial least squares regression: estimating and minimizing the mean squared error of prediction / M. C. Denham. – Текст : непосредственный // Journal of Chemometrics. – 2000. – Vol. 14. Choosing the number of factors in partial least squares regression. – № 4. – P. 351–361.

19 Dixon, K. StarFire: A Global SBAS for Sub-Decimeter Precise Point Positioning / K. Dixon. – Текст : непосредственный // Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2006). – Fort Worth, TX, 2006. – P. 2286–2296.

20 Dolin, S. RTKLIB 2.4.3 b34 with support differential code biases for GPS, GLONASS, Galileo (fork) / S. Dolin. – URL: https://github.com/Sergey-Dolin/RTKLIB/tree/rtklib_2.4.3. – Текст : электронный.

21 Dong, D. Global Positioning System Network analysis with phase ambiguity resolution applied to crustal deformation studies in California / D. Dong, Y. Bock – Текст : непосредственный // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1989. – Vol. 94, № B4. – P. 3949–3966.

22 Erkelens, J. S. Minimum Mean-Square Error Estimation of Discrete Fourier Coefficients With Generalized Gamma Priors / J. S. Erkelens. – Текст : непосредственный // IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing. – 2007. – Vol. 15, № 6. – P. 1741–1752.

23 European Union Agency for the Space Programme. EUSPA EO and GNSS Market Report.2022. Issue 1 / European Union Agency for the Space Programme. – LU : Publications Office, 2022. – Текст : непосредственный.

24 European Union Agency for the Space Programme. EUSPA EO and GNSS Market Report.2024. Issue 2 / European Union Agency for the Space Programme. – LU : Publications Office, 2024. – Текст : непосредственный.

25 Feng, Y. Network-based geometry-free three carrier ambiguity resolution and phase bias calibration / Y. Feng, C. Rizos – Текст : непосредственный // GPS Solutions. – 2009. – Vol. 13, № 1. – P. 43–56.

26 Gao, J. B. Some remarks on Kalman filters for the multisensor fusion / J. B. Gao, C. J. Harris. – Текст : непосредственный // Information Fusion. – 2002. – Vol. 3, № 3. – P. 191–201.

27 Ge, M. An analysis of BDS-3 real-time PPP: Time transfer, positioning, and tropospheric delay retrieval / M. Ge. – Текст : непосредственный // Measurement. – 2021. – Vol. 172. – P. 108871.

28 Ge, M. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations / M. Ge. – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. – 2008. – Vol. 82, № 7. – P. 389–399.

29 Geng, J. Integer ambiguity resolution in precise point positioning: method comparison / J. Geng. – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. – 2010. – Vol. 84, № 9. – P. 569–581.

30 Geng, J. Speeding up PPP ambiguity resolution using triple-frequency GPS/BeiDou/Galileo/QZSS data / J. Geng. – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. – 2020. – Vol. 94, № 1. – P. 6.

31 Geng, J. Triple-frequency GPS precise point positioning with rapid ambiguity resolution / J. Geng, Y. Bock – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. – 2013. – Vol. 87, № 5. – P. 449–460.

32 GNSS Differential Code Bias Product. – URL: <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/bias/>. – Текст : электронный.

33 Görres, B. Absolute calibration of GPS antennas: laboratory results and comparison with field and robot techniques / B. Görres. – Текст : непосредственный // GPS Solutions. – 2006. – Vol. 10, № 2. – P. 136–145.

34 Han, J. Development of a Moving Baseline RTK/Motion Sensor-Integrated Positioning-Based Autonomous Driving Algorithm for a Speed Sprayer / J. Han, C. Park, Y. Y. Jang. – Текст : непосредственный // Sensors. – 2022. – Vol. 22, № 24. – P. 9881.

35 Hauschild, A. Kalman-filter-based GPS clock estimation for near real-time positioning / A. Hauschild, O. Montenbruck – Текст : непосредственный // GPS Solutions. – 2009. – Vol. 13, № 3. – P. 173–182.

36 He, Q. Long-Term Performance Evaluation of BeiDou PPP-B2b Products and Its Application in Time Service / Q. He. – Текст : непосредственный // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15, № 5. – P. 1358.

37 Herring, T. A. GLOBK. Reference Manual. Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program. Release 10.4 / T. A. Herring, R. W. King, S. C. McClusky. – 2006. – Текст : непосредственный.

38 Hou, P. Multi-frequency phase-only PPP-RTK model applied to BeiDou data / P. Hou. – Текст : непосредственный // GPS Solutions. – 2022. – Vol. 26, № 3. – P. 76.

39 Huang, G. Real-time estimation of satellite clock offset using adaptively robust Kalman filter with classified adaptive factors / G. Huang, Q. Zhang – Текст : непосредственный // GPS Solutions. – 2012. – Vol. 16, № 4. – P. 531–539.

40 IERS Conventions (2003) / G. Petit, B. Luzum (eds). – 2004. – 127 p. – Текст : непосредственный.

41 IERS Conventions (2010) / G. Petit, B. Luzum (eds.)– 2010. – 179 p. – Текст : непосредственный.

42 Janssen, V. A comparison of the VRS and MAC principles for network RTK / V. Janssen. – 2009. – Текст : непосредственный.

43 Jazaeri, S. Fast integer least-squares estimation for GNSS high-dimensional ambiguity resolution using lattice theory / S. Jazaeri, A. R. Amiri-Simkooei, M. A. Sharifi – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. – 2012. – Vol. 86, № 2. – P. 123–136.

44 Julier, S. J. Unscented Filtering and Nonlinear Estimation / S. J. Julier, J. K. Uhlmann. – Текст : непосредственный // Proceedings of the IEEE. – 2004. – Vol. 92, № 3. – P. 401–422.

45 Kalman, R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems / R. E. Kalman – Текст : непосредственный. // Journal of Basic Engineering. – 1960. – Т. 82. – С. 35–45.

46 Kiliszek, D. Performance of the precise point positioning method along with the development of GPS, GLONASS and Galileo systems / D. Kiliszek, K. Kroszczyński. – Текст : непосредственный // Measurement. – 2020. – Vol. 164. – P. 108009.

47 Kleeman, L. Understanding and Applying Kalman Filtering / L. Kleeman. – 32 p. – Текст : непосредственный.

48 Kopeikin, S. M. Frontiers of Relativistic Celestial Mechanics / S. M. Kopeikin. – 2014. – Текст : непосредственный.

49 Kröger, J. Determination of Phase Center Corrections for Galileo Signals / J. Kröger. – 2019. – Текст : непосредственный.

50 Kröger, J. Session G1.3: High-precision GNSS: methods, open problems and Geoscience applications.

51 Lacy, M. C. de. Real-time cycle slip detection in triple-frequency GNSS / M. C. de Lacy, M. Reguzzoni, F. Sansò. – Текст : непосредственный // GPS Solutions. – 2012. – Vol. 16, № 3. – P. 353–362.

52 Laurichesse, D. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination / D. Laurichesse. – Текст : непосредственный // Navigation. – 2009. – Vol. 56, № 2. – P. 135–149.

53 Laurichesse, D. The CNES Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution demonstrator / D. Laurichesse. – 2011. – Текст : непосредственный.

54 Li, X. Real-time GPS sensing of atmospheric water vapor: Precise point positioning with orbit, clock, and phase delay corrections / X. Li. – Текст : непосредственный // Geophysical Research Letters. – 2014 – Vol. 41, № 10. – P. 3615–3621.

55 Li, X. Regional reference network augmented precise point positioning for instantaneous ambiguity resolution / X. Li, X. Zhang, M. Ge – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. – 2011. – Vol. 85, № 3. – P. 151–158.

56 Li, X. Review of PPP–RTK: achievements, challenges, and opportunities / X. Li. – Текст : непосредственный // Satellite Navigation. – 2022. – Vol. 3, № 1. – P. 28.

57 Li, Z. Two-step method for the determination of the differential code biases of COMPASS satellites / Z. Li. – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. – 2012. – Vol. 86, № 11. – P. 1059–1076.

58 Lipatnikov, L. A. Cost Effective Precise Positioning with GNSS / L. A. Lipatnikov, S. O. Shevchuk. – Текст : электронный // FIG Publications 74. – 2019. – URL: <https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub74/Figpub74.pdf>.

59 Liu, T. Multi-GNSS triple-frequency differential code bias (DCB) determination with precise point positioning (PPP) / T. Liu. – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. 2019. Vol. 93. № 5. – P. 765-784.

60 Mirza, M. J. A Modified Kalman Filter for Non-gaussian Measurement Noise / M. J. Mirza. – Текст : непосредственный // Communication Systems and Information Technology. Springer, 2011. – С. 401–409.

61 Montenbruck, O. Differential Code Bias Estimation using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps: Mult-GNSS DCB Estimation / O. Montenbruck,

A. Hauschild, P. Steigenberger – Текст : непосредственный // Navigation. – 2014. – Vol. 61, № 3. – P. 191–201.

62 Montenbruck, O. GNSS satellite geometry and attitude models / O. Montenbruck. – Текст : непосредственный // Advances in Space Research. – 2015. – Vol. 56, № 6. – P. 1015–1029.

63 Montenbruck, O. The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, prospects and challenges // Advances in Space Research. – 2017. – Vol. 59, № 7. – P. 1671–1697.

64 Naciri, N. An uncombined triple-frequency user implementation of the decoupled clock model for PPP-AR / N. Naciri, S. Bisnath. – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. – 2021. – Vol. 95, № 5. – P. 60.

65 Pan, L. Ambiguity resolved precise point positioning with GPS and BeiDou / L. Pan, Z. Xiaohong, G. Fei. – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. – 2017. – Vol. 91, № 1. – P. 25–40.

66 Pehlivan, H. Performance of network RTK correction techniques (FKP, MAC and VRS) under limited sky view condition / H. Pehlivan, M. BezciOglu, M. Yilmaz. – Текст : непосредственный // International Journal of Engineering and Geosciences. – 2019. – Vol. 4, № 3. – P. 106–114.

67 RINEX. The Receiver Independent Exchange Format. Version 4.00 / Ignacio Romero (ed.). – IGS/RTCM RINEX WG Chair ESA/ESOC/Navigation Support Office Darmstadt, Germany, 2021. – Текст : непосредственный

68 Rizos, C. The «uberization» of the GNSS Positioning Infrastructure / C. Rizos, J. van. Cranenbroeck, V. A. Salsaten, M. Burbidge, Z. Guan. – Текст : непосредственный // FIG Working Week 2019. 22–26 April, Hanoi, Vietnam. – 2019. – P. 19.

69 Rui Hirokawa, S. R. PPP/PPP-RTK open formats: Overview, comparison, and proposal for an interoperable message / S. R. Rui Hirokawa. – Текст : непосредственный // Navigation. – 2021. – Т. 68, № 4. – С. 759–778.

70 SBAS Standards. – URL: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS_Standards. – Текст : электронный.

71 Schaer, S. SINEX BIAS-Solution (Software/technique) INdependent EXchange Format for GNSS Biases Version 1.00 / S. Schaer. – 2015. – P. 52. – Текст : непосредственный.

72 Schmid, R. Absolute phase center corrections of satellite and receiver antennas: Impact on global GPS solutions and estimation of azimuthal phase center variations of the satellite antenna // GPS Solutions. – 2005. – Vol. 9, № 4. – P. 283–293.

73 Schmid, R. Interactions of the IGS reprocessing and the IGS antenna phase center model / R. Schmid, P. Steigenberger, U. Hugentobler. – 2009. – Текст : непосредственный.

74 Shevchuk, S. Automatization for geodetic support of 3D transient electromagnetic 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.

75 Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems / P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck (eds.). – Cham : Springer International Publishing, 2017. – ISBN 978-3-319-42926-7. – Текст : непосредственный.

76 Takacs, F. The Relationship Between Network RTK Solutions MAC, VRS, PRS, FKP and i-MAX / F. Takacs, O. Zelzer. – Текст : непосредственный // Proceedings of the

21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), Savannah, GA, September 2008. – P. 348–355.

77 Takasu, T. RTKLIB ver. 2.4.2 Manual / T. Takasu. – 2013. – Текст : непосредственный.

78 Tao, J. Real-time regional tropospheric wet delay modeling and augmentation performance for triple-frequency PPP/PPP-IAR during typhoon weather / J. Tao. – Текст : непосредственный // GPS Solutions. – 2024. – Vol. 28, № 2. – P. 96.

79 Teunissen, P. J. G. An optimality property of the integer least-squares estimator / P. J. G. Teunissen. – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. 1999. – Vol. 73, № 11. – P. 587–593.

80 Teunissen, P. J. G. A-PPP: Array-Aided Precise Point Positioning With Global Navigation Satellite Systems / P. J. G. Teunissen. – Текст : непосредственный // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2012. – Vol. 60, № 6. – P. 2870–2881.

81 Teunissen, P. J. G. BLUE, BLUP and the Kalman filter: some new results / P. J. G. Teunissen, A. Khodabandeh. – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. – 2013. – Vol. 87, № 5. – P. 461–473.

82 Teunissen, P. J. G. Integer least-squares theory for the GNSS compass / P. J. G. Teunissen. – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. – 2010. – Vol. 84, № 7. – P. 433–447.

83 Teunissen, P. J. G. Success probability of integer GPS ambiguity rounding and bootstrapping / P. J. G. Teunissen. – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. – 1998. – Vol. 72, № 10. – P. 606–612.

84 Teunissen, P. J. G. The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation / P. J. G. Teunissen. – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. – 1995. – Vol. 70, № 1-2. – P. 65–82.

85 The International Terrestrial Reference Frame (ITRF). – URL: <http://itrf.ensg.ign.fr/>. – Текст: электронный.

86 Tolman, B. W. GPS precise absolute positioning via Kalman filtering / B. W. Tolman. – Текст : непосредственный // The Ionosphere. – 2008. – Vol. 2, № L1. – С. L2.

87 Trimble GNSS planning online. – URL: <https://www.gnssplanning.com/>. – Текст : электронный.

88 Tuchler, M. Minimum mean squared error equalization using a priori information / M. Tuchler, A. C. Singer, R. Koetter. – Текст : непосредственный // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2002. – Vol. 50, № 3. – P. 673–683.

89 Van Bree, R. J. P. Real-time single-frequency precise point positioning: accuracy assessment / R. J. P. Van Bree, C. C. J. M. Tiberius. – Текст : непосредственный // GPS Solutions. – 2012. – Vol. 16, № 2. – P. 259–266.

90 Vanek, B. Position and Attitude Determination in Urban Canyon with Tightly Coupled Sensor Fusion and a Prediction-Based GNSS Cycle Slip Detection Using Low-Cost Instruments / B. Vanek, M. Farkas, S. Rózsa. – Текст : непосредственный // Sensors. – 2023. – Vol. 23, № 4. – P. 2141.

91 Vehicle Positioning for C-ITS in Australia(Background Document) / D. Green, J. Gaffney, P. Bennett, Y. Feng, M. Higgins, J. Millner. – AP-R431-13, 2013. – Текст : непосредственный.

92 Walter, T. Satellite-Based Augmentation Systems (SBASs) / T. Walter. – Текст : непосредственный // Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century / eds. Y.T.J. Morton [et al.]. – Wiley, 2020. – P. 277–306.

93 Wan, A. T. K. Minimum mean-squared error estimation in linear regression with an inequality constraint / A. T. K. Wan, K. Ohtani – Текст : непосредственный // Journal of Statistical Planning and Inference. 2000. Vol. 86. № 1. – P. 157-173.

94 Wan, E. Sigma-Point Filters: An Overview with Applications to Integrated Navigation and Vision Assisted Control / E. Wan. – Текст : непосредственный // 2006 IEEE Non-linear Statistical Signal Processing Workshop. – Cambridge, UK : IEEE, 2006. – P. 201–202.

95 Wang, N. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations / N. Wang. – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. – 2016. – Vol. 90, № 3. – P. 209–228.

96 Wübbena, G. Absolute GNSS Antenna Calibration with a Robot: Repeatability of Phase Variations, Calibration of GLONASS and Determination of Carrier-to-Noise Pattern / G. Wübbena. – Текст : непосредственный.

97 Wübbena, G. PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks / G. Wübbena, M. Schmitz, A. Bagge. – Текст : непосредственный.

98 Wübbena, G. SSR Technology for Scalable Real-Time GNSS Applications / G. Wübbena. – 2017. – P. 20. – Текст : непосредственный.

99 Xu, Y. Performance evaluation of BDS-3 PPP-B2b precise point positioning service / Y. Xu, Y. Yang, J. Li. – Текст : непосредственный // GPS Solutions. – 2021. – Vol. 25, № 4. – P. 142.

100 Zeng, T. Uncombined precise orbit and clock determination of GPS and BDS-3 / T. Zeng. – Текст : непосредственный // Satellite Navigation. – 2020. – Vol. 1, № 1. – P. 19.

101 Zhang, X. The improvement in integer ambiguity resolution with INS aiding for kinematic precise point positioning / X. Zhang. – Текст : непосредственный // Journal of Geodesy. – 2019. – Vol. 93, № 7. – P. 993–1010.

102 Zou, X. URTK: undifferenced network RTK positioning / X. Zou. – Текст : непосредственный // GPS Solutions. – 2013. – Vol. 17, № 3. – P. 283–293.

103 Zumberge, J. F. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks / J. F. Zumberge. – Текст : непосредственный // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1997. – Vol. 102, № B3. – P. 5005–5017.