

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ GNSS RTK

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-7-4-22

Manuscript received 15 April 2026;

Accepted 20 June 2026

Фокин Григорий Алексеевич,
СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург,
Россия, grihafokin@gmail.com, fokin.ga@sut.ru

Тишков Антон Олегович,
СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург,
Россия, anton.tishkov.2000@mail.ru

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации по теме: "Разработка фрагмента модельной гибридной орбитально-наземной сети связи и проведение прикладных научных исследований на её базе", соглашение № 071-03-2026-010.

Ключевые слова: GNSS RTK, NMEA, RINEX, RTCM, PrinCe, RTKLIB, LOS, NLOS, OLOS, позиционирование

Несмотря на существенный прогресс в определении местоположения устройств наземных сотовых сетей 4G LTE, 5G NR и беспроводных локальных сетей WiFi за последние годы сервисы позиционирования сантиметровой точности в реальном времени в федеральном масштабе географической протяженности на сегодняшний день доступны исключительно глобальным навигационным спутниковым системам (ГНСС, GNSS - Global Navigation Satellite System) с системами дифференциальной коррекции (СДК). Наибольшее распространение получили системы GNSS с СДК "кинематика реального времени" RTK (Real Time Kinematic). Программно-аппаратные комплексы (ПАК) GNSS RTK геодезического класса с подпиской на сервисы сети опорных базовых станций привязки помимо качественной аппаратной составляющей приема первичных измерений работают с использованием проприетарного программного обеспечения, реализующего высокоэффективные алгоритмы вторичной постобработки, и позволяют достигать в реальном времени миллиметровой точности оценок координат (ОК). Помимо высокой точности ОК при наличии прямой видимости LOS (Line Of Sight) системы GNSS RTK геодезического класса эффективно компенсируют эффекты многолучевости и в сценариях полного NLOS (Non LOS) или частичного OLOS (Obstructed LOS) отсутствия прямой видимости между антенной ровера и спутниками ГНСС. Более доступным и массовым устройствам GNSS RTK потребительского сегмента сопоставимая точность недоступна ни в сценариях LOS, ни тем более в условиях NLOS. Актуальной и востребованной на сегодняшний день задачей является повышение точности позиционирования систем GNSS RTK потребительского сегмента за счет постобработки первичных ГНСС измерений в библиотеке с открытым исходным кодом RTKLIB. В настоящей работе выполняется экспериментальное исследование точности позиционирования систем GNSS RTK с использованием ПАК геодезического класса PrinCe. Оценки координат получаются как непосредственно из PrinCe, так и в результате постобработки первичных измерений в RTKLIB. Выполняется анализ параметров: среднеквадратическое отклонение (СКО) оценок координат, количество используемых спутников и геометрический фактор снижения точности. Целью исследования является поиск и обоснование путей повышения точности позиционирования систем GNSS RTK посредством постобработки в RTKLIB при частичном OLOS отсутствии прямой видимости. В результате исследования показано, что предварительная пространственная фильтрация первичных измерений по азимуту и углу места позволяет повысить точность позиционирования по сравнению с постобработкой в RTKLIB по умолчанию. Впервые для сценариев OLOS выполнено сравнение точности ОК, полученных как непосредственно из ПАК геодезического класса, так и в результате постобработки в RTKLIB. Теоретическая значимость заключается в экспериментальном обосновании пространственной фильтрации по азимуту и углу места в сценариях OLOS. Практическая значимость исследования заключается в повышении точности позиционирования систем GNSS RTK потребительского сегмента без использования антенных решёток.

Информация об авторах:

Фокин Григорий Алексеевич, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой беспроводных технологий и систем, г. Санкт-Петербург, Россия. ORCID 0000-0002-5358-1895

Тишков Антон Олегович, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ассистент кафедры беспроводных технологий и систем, г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Фокин Г. А., Тишков А.О. Экспериментальное исследование точности позиционирования систем GNSS RTK // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №7. С. 4-22.

For citation:

G. A. Fokin, A. O. Tishkov, "Experimental Study of the Positioning Accuracy of GNSS RTK Systems," T-Comm, 2026, vol. 20, no. 7, pp. 4-22. (in Russian)

Введение

Высокоточное определение местоположения (ОМП) является актуальным и востребованным направлением исследований в современных и перспективных гибридных орбитально-наземных сетях радиосвязи и радионавигации [1]. Достижение метровой, дециметровой и сантиметровой точности позиционирования в наземных сотовых сетях 4G LTE [2] и 5G New Radio [3, 4], беспроводных локальных сетях WiFi IEEE 802.11az [5] и перспективных сетях 6G [6, 7] соответственно открывает широкие возможности их практического использования. Однако остается ряд сценариев, включая ОМП транспортных средств [8, 9], где требуется сантиметровая точность оценок координат (ОК) в реальном времени. На сегодняшний день такая точность доступна глобальным навигационным спутниковым системам (ГНСС) [10] с системами дифференциальной коррекции (СДК) [11]. Наибольшее распространение получили системы GNSS (Global Navigation Satellite System) класса «кинематика реального времени» RTK (Real Time Kinematic) [12]. Вторичная обработка ГНСС измерений и поправок СДК [13] в проприетарных комплексах GNSS RTK геодезического класса типа PrinCe [14-16] позволяет достичь сантиметровой точности ОМП. Однако в более доступных устройствах потребительского сегмента [17] такая точность в реальном времени пока недоступна. Для исследования методов и средств повышения точности позиционирования системами GNSS RTK можно воспользоваться открытой библиотекой RTKLIB [18]. В ней используются данные первичных радиотехнических ГНСС измерений в формате RINEX (Receiver Independent Exchange Format) [19], поправки СДК в формате RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services) [29], передаваемые через NTRIP-соединение (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) [21], и оценки координат в формате NMEA (National Marine Electronics Association) [22]. Для анализа порядка постобработки первичных измерений и поправок в RTKLIB в настоящей работе выполняется анализ форматов данных, используемых для экспериментального исследования точности позиционирования GNSS RTK.

Сантиметровая точность ОК в реальном времени достигается в известной системе дифференциальной коррекции «кинематика реального времени» RTK [12] за счет использования опорного стационарного навигационного приемника (базы), установленного в точке, координаты которой известны из опорной сети дифференциальных геодезических станций [23]. Выполняя первичные измерения ГНСС и вычисляя оценку своих координат, база сопоставляет их с известными ей истинными координатами [12]. После сопоставления вычисляются отклонения, из чего формируются поправки, которые в реальном времени от базы поступают на мобильный приемник ровер, который использует их для уточнения уже своих координат [13]. На сегодняшний день GNSS RTK остается наиболее распространенным решением достижения сантиметровой точности оценок координат радиотехническими средствами.

Использование программно-аппаратного комплекса геодезического класса PrinCe [14-16] позволяет получать как непосредственные координаты GNSS RTK, так и записывать первичные ГНСС измерения с ровера и поправки с базы для

их последующей постобработки. Постобработка первичных измерений формата RINEX [19] в открытой библиотеке RTKLIB [18] позволяет получить оценки координат, которые можно затем сравнить с таковыми из PrinCe. Получение непосредственных оценок координат из программно-аппаратного комплекса PrinCe и других аналогичных решений геодезического класса отличается высокой точностью, которая обычно недоступна устройствам потребительского сегмента [16]. Алгоритмы постобработки измерений в комплексах геодезического класса обычно недоступны для верификации. В то же время устройства PrinCe [14-16] имеют необходимые программно-аппаратные интерфейсы для записи первичных измерений ГНСС с ровера и поправок с базы в формате RINEX [19]. Дальнейшую постобработку измерений можно реализовать в библиотеке с открытым исходным кодом RTKLIB [18]. Использование такого подхода позволяет отслеживать влияние навигационных параметров на точность ОМП.

Известно, что основным фактором снижения точности позиционирования в радиотехнических системах является полное или частичное отсутствие прямой видимости между источниками и приемниками радиосигналов [24-26, 50].

Экспериментальное исследование точности систем GNSS RTK в условиях полного наличия LOS (Line of Sight) и полного отсутствия прямой видимости NLOS (Non LOS) при экранировании металлическим экраном было выполнено в [27]. В настоящей работе исследуется частичное отсутствие прямой видимости при экранировании металлической решеткой OLOS (Obstructed LOS) и при затенении одной стороны приема стеной WLOS (Wall LOS). Для каждого сценария описываются условия эксперимента, приводится оценка координат PrinCe, ОК с постобработкой в RTKLIB, выполняется сравнение решений PrinCe и RTKLIB, после чего формулируются выводы. Опорный сценарий LOS служит эталоном, относительно которого оценивается снижение точности по среднеквадратическому отклонению (СКО) ОК и ряду других параметров: статус решения, количество спутников, значения HDOP, статус RTK-Fix и др.

Целью настоящего исследования является поиск и обоснование путей повышения точности позиционирования системами GNSS RTK в условиях полного NLOS или частичного OLOS отсутствия прямой видимости между антенной ровера и спутниками ГНСС.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи. В разделе 1 приводится анализ состояния проблемы повышения точности позиционирования систем GNSS RTK на основе последних публикаций в данной предметной области. В разделе 2 описывается организация эксперимента по исследованию точности позиционирования систем GNSS RTK. В разделах 3 и 4 представлены результаты экспериментальной оценки точности позиционирования систем GNSS RTK на оборудовании геодезического класса PrinCe в сценариях OLOS и WLOS. В разделе 5 показаны пути повышения точности систем GNSS RTK в условиях OLOS и WLOS посредством пространственной фильтрации. Раздел 6 содержит выводы и направления дальнейших исследований.

1 Анализ состояния проблемы повышения точности позиционирования систем GNSS RTK

В работе [28] исследуется проблема утраты связи в канале дифференциальных поправок между стационарной базовой

станцией и подвижным ровером в системе GNSS RTK, интегрированной с бесплатформенной инерциальной навигационной системой (ИНС). В такой ИНС инерциальные измерительные модули IMU (Inertial Measurement Unit) образованы микро-электромеханическими системами MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) из гироскопов и акселерометров, которые жестко связаны с подвижным объектом позиционирования. Такие системы называют жестко-связанными ИНС SINS (Strapdown Inertial Navigation System). Для решения проблемы утраты связи в канале поправок предлагается формирование непрерывного вектора вторых разностей радионавигационных параметров фазы за счет использования предыстории дифференциальных поправок от базы вместе с текущими измерениями ГНСС ровера. Результаты имитационного моделирования и эксперимента показали, что в период утраты связи в канале поправок точность оценок координат снижается с сантиметровой до дециметровой. Использование же предложенного подхода обеспечивает стабильность и поддерживает сантиметровую точность оценок координат.

Задача повышения точности ОМП в сценариях работы интегрированных систем SINS/GNSS RTK и позиционирования высокой точности PPP (Precise Point Positioning) посредством усовершенствования расширенного фильтра Калмана (РФК, EKF – Extended Kalman Filter) и разработки итеративного эквивалентного фильтра I-EqF (Iterated Equivalent Filter) решается в работе [29]. Результаты экспериментальной апробации в полевых условиях с устройствами SINS/GNSS потребительского сегмента показали достижение сантиметровой точности, в частности, в сценариях с большим разбросом оценок координат по высоте.

Развитию совместного использования подходов PPP- RTK посвящена работа [30]. Системы GNSS RTK используют первичные измерения фазы несущей ГНСС совместно с поправками от наземных станций СДК в реальном времени. Известным ограничением систем RTK является необходимость наличия и дальность функционирования радиоканала в десятки километров между базой и наземной станцией СДК, а также радиоканала между базой и ровером. Системы PPP лишены этого ограничения и реализуют позиционирование высокой точности посредством получения поправок к эфемеридам орбит и бортовым часам видимых спутников ГНСС (ЭВИ – эфемеридно-временная информация) от глобальных источников, расположенных на расстоянии в тысячи километров; также метод PPP отличается от RTK тем, что поправки вносятся в параметры орбит и часов, а не в измерения фаз несущих сигналов ГНСС [31]. Предложенный в [30] подход обработки поправок ЭВИ SSR (State Space Representation) от глобального источника и атмосферных поправок от единственной региональной опорной станции показал сантиметровую и дециметровую точность позиционирования для стационарного и подвижного объекта соответственно.

Исследованию особенностей постобработки первичных измерений ГНСС методом RTK, собранных устройствами потребительского сегмента, посвящена работа [32]. Показано, что целочисленное разрешение неоднозначностей AR (Ambiguity Resolution) фаз несущей радиосигнала при сборе первичных измерений смартфонами затруднено по причине их высокой зашумленности. Предложенный альтернативный метод частичного разрешения фазовых неоднозначностей показал сантиметровую и дециметровую точность оценок

координат в сценарии позиционирования стационарного и подвижного объекта соответственно.

Использование информации о карте объектов для повышения точности позиционирования системами GNSS RTK в сложных городских условиях исследуется в работе [33]. Идея предложенного подхода заключается в возможности прогнозирования условий распространения радиоволн (РРВ) по цифровым 3D картам и классификации наблюдаемых ГНСС приемником спутниковых сигналов на сигналы с наличием LOS и отсутствием NLOS прямой видимости. Недостатком данного подхода для движущегося приемника является сложность пространственной фильтрации сигналов NLOS в режиме реального времени. В [33] развивается концепция карты прогноза источников ошибок приема сигналов ГНСС в текущем участке пространства, задаваемого сеткой азимутов и углов места, для заданной траектории движения приемника. Данная концепция призвана снизить сложность коррекции ошибок, вызванных сигналами NLOS, без необходимости использования инструментов трассировки лучей по цифровым моделям местности. Использование весовых коэффициентов для принятых сигналов ГНСС, являющихся потенциальными источниками ошибок, в РФК показывает достижение дециметровой точности позиционирования в сложных городских условиях.

Техника целочисленного разрешения неоднозначностей IAR (Integer Ambiguity Resolution) фазы несущей, определяющая точность позиционирования в системах GNSS RTK, исследуется в [34]. Для повышения эффективности IAR предлагается интеграция инерциальных навигационных систем INS с одночастотными сигналами ГНСС различных группировок, включая GPS, Galileo, GLONASS, BDS. Суть предлагаемого метода сводится к комплексированию радиотехнических измерений дифференцированных по времени фаз несущей TDCP (Time Differenced Carrier Phase) и вторых разностей фаз несущей DDCP (Double Differenced Carrier Phase) с измерениями инерциальных измерительных модулей IMU; при этом частота взятия первичных радиотехнических и инерциальных измерений составляет 1 и 100 Гц соответственно. Авторы также сообщают о высокой вычислительной эффективности предложенного метода и возможности его реализации в реальном времени на борту позиционируемого объекта. Результаты эксперимента в условиях городской застройки показали дециметровую точность оценок координат.

В работе [35] исследуется позиционирование внутри помещений на основе интеграции методов счисления пути пешехода PDR (Pedestrian Dead Reckoning) и кинематики реального времени RTK. Система GNSS RTK используется для установления и коррекции направления (курса) движения пешехода. Результаты эксперимента с комплексированием измерений GNSS RTK и датчика MEMS IMU показывают дециметровую точность оценок координат и погрешность определения направления движения менее одного градуса.

Использование антенных решеток (АР) с известной геометрией составных элементов в ровере GNSS RTK для повышения точности позиционирования исследуется в работе [36]. Показана целесообразность использования АР линейной конфигурации с числом элементов от трех до шести. Эксперимент с ровером, удаленным от базы на полкилометра и оборудованным тремя антеннами в вершинах правильного треугольника со сторонами в 0,63 м, продемонстрировал

повышение вероятности целочисленного разрешения фазовых неоднозначностей с оценками координат дециметровой точности с 70 до 90%.

В [37] исследуются возможности вторичной обработки первичных измерений ГНСС в современных смартфонах на операционной системе Android. Такая возможность предусмотрена инициативой компании Гугл по достижению дециметровой точности позиционирования смартфонами GSDC (Google Smartphone Decimeter Challenge) [38]. Для вторичной обработки в [37] используется библиотека с открытым исходным кодом RTKLIB [18]. Результаты постобработки в RTKLIB сравниваются с оценками координат, полученными серийными чипсетами в формате NMEA [19]. Результаты постобработки измерений ГНСС, собранных смартфонами Google Pixel 6, Pixel 9, Xiaomi 14T Pro и Samsung S24, в RTKLIB в режиме DGNS (Differential GNSS) [39], PPK (Post Processing Kinematic) [40] и PPP (Precise Point Positioning) [41] показали метровую точность оценок координат. Показана актуальность проведения подобных исследований для режима GNSS RTK.

В [42] для надежного позиционирования подвижного железнодорожного состава предлагается использовать постобработку навигационных параметров трех сенсоров: приемника GNSS, инерциального модуля IMU и базовой станции поправок RTK. Специфика комплексирования заключается в использовании решений RTK со статусом Float, полученных без целочисленного разрешения фазовых неоднозначностей. Результаты эксперимента показали достижение метровой точности оценок координат с требуемым доверительным интервалом.

Для компенсации негативных эффектов многолучевого PPB на прием спутниковых сигналов в [43] развивается идея использования пространственной фильтрации сигналов ГНСС посредством антенны с синтезированной апертурой SAA (Synthetic Aperture Antenna). Данный подход реализует адаптивное диаграммообразование на подвижном объекте с заданной периодичностью для формирования максимального коэффициента усиления в направлении на те спутники, которые в текущий момент времени находятся в условиях прямой видимости с ГНСС приемником [44-46]. Результаты имитационного моделирования и натурного эксперимента продемонстрировали повышение точности и стабильности получаемых методом GNSS RTK оценок координат в сценариях городской застройки.

Для компенсации эффектов многолучевости при отсутствии прямой видимости NLOS в условиях плотной городской застройки в [47] исследуется комплексирование измерений RTK с измерениями системы LIO (LiDAR/ Inertial Odometry) из лидара и инерциальной одометрии. Точность позиционирования без целочисленного разрешения фазовых неоднозначностей, полученная в результате постобработки наборов сырых данных, доступных в открытом доступе, составила единицы метров. Важной особенностью работы являются доступные для верификации программные модули, использованные для сравнения предложенного решения RTK/LIO с решением RTKLIB.

Оценке уязвимости работы систем GNSS RTK к преднамеренным энергетическим помехам и спуфингу с предварительной синхронизацией в адрес базовой станции внесения поправок посвящена работа [48]. Исследование проводится с

использованием открытой библиотеки RTKLIB, на вход которой подаются первичные измерения ровера и поправки RTCM [20] от базовой станции в формате Ntrip [21]. Показана уязвимость координатно-временного обеспечения PNT (Positioning, Navigation, Timing) средствами постобработки в RTKLIB при отсутствии каких-либо мер противодействия. Одним из способов противодействия является получение оценок координат ровером как с поправками от базы, так и без, после чего следует сравнение разброса ОК и вывод о целесообразности исключения поправок из постобработки. Другим способом является предварительная проверка достоверности поправок от базы посредством оценки координат ровера при условии априорного знания его точного местоположения.

Перспективность постобработки первичных фазовых измерений для режима GNSS RTK приемниками геодезического класса и потребительского сегмента была обозначена уже достаточно давно [49] и уже тогда показывала дециметровую точность оценок координат, в том числе, для одностатных приемников.

Проведенный анализ состояния проблемы повышения точности позиционирования систем GNSS RTK позволяет сделать следующие выводы: 1) основным источником снижения точности является многолучевость при полном или частичном отсутствии прямой видимости между антенной ровера и спутниками ГНСС в условиях городской застройки; 2) распространенным средством повышения точности остается комплексирование первичных радиотехнических и инерциальных измерений; 3) частные результаты экспериментальной апробации со специализированными алгоритмами обработки показывают, что в сложных условиях приема сигналов ГНСС достигается сантиметровая и дециметровая точность оценок координат для стационарного и подвижного объекта соответственно; 4) авторы работ не выкладывают в свободный доступ программную реализацию предлагаемых в своих исследованиях алгоритмов постобработки, что затрудняет верификацию публикуемых научных результатов; 5) широко распространенным в научном сообществе направлением повышения точности позиционирования является постобработка первичных радиотехнических измерений ГНСС в библиотеке с открытым исходным кодом RTKLIB и конфигурацией параметров; 6) перспективным направлением повышения точности позиционирования систем GNSS RTK является пространственная фильтрация сигналов ГНСС с выборочной обработкой тех спутников, которые в текущий момент времени находятся в условиях LOS с приемником и отбрасыванием сигналов тех спутников, которые с высокой вероятностью находятся в условиях полного или частичного отсутствия прямой видимости.

2 Организация эксперимента по исследованию точности позиционирования систем GNSS RTK

Метод RTK основан на использовании опорного навигационного приемника (базы), установленного в точке с точно известными координатами. Этот приемник, получая спутниковые измерения ГНСС, выполняет на их основе ОК, затем вычисляет отклонения от истинных координат и формирует поправки. Данные поправки в реальном времени передаются на мобильный приемник (ровер), который использует их для уточнения своего местоположения. Это позволяет достигать миллиметровой точности.

В рамках исследования была организована следующая схема оценки. В качестве базовой станции использовался приемник PrinCe i30 [14] и контроллер PrinCe HCE620 [15]. Для точного определения координат базовой станции использовалась сеть дифференциальных геодезических станций «Геоспайдер» [23]. Приемник PrinCe i30 изначально был настроен в режим ровера и получал дифференциальные поправки через NTRIP-соединение [21]. Данный протокол позволяет передавать корректирующие данные в формате RTCM [20] от сети геодезических станций [23] в реальном времени через интернет. Поправки RTCM принимались клиентским приложением PrinCe i30 и использовались для высокоточного ОМП согласно рис. 1.

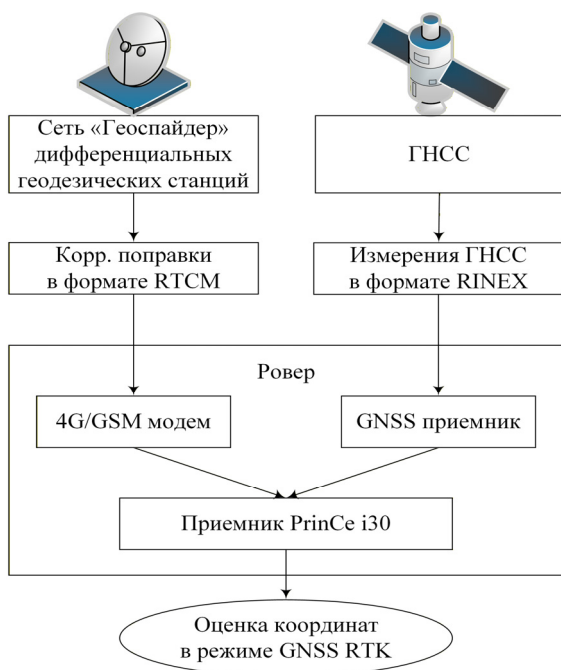


Рис. 1. Схема получения опорных координат базовой станцией

После точного определения координат приемника PrinCe i30 он переводился в режим стационарной базовой станции с фиксацией полученной опорной точки. В роли ровера использовался приемник PrinCe i90VR [16], который получал поправки от базы PrinCe i30 [14] по радиоканалу УКВ-диапазона. Для записи оценок координат, полученных в специализированном программном обеспечении (СПО) PrinCe, и сбора ГНСС измерений в формате RINEX [19] и поправок с базы PrinCe i30 в формате RTCM [20] для постобработки в открытой библиотеке RTKLIB к роверу был подключён ноутбук по схеме на рис. 2.

Результаты исследования призваны выявить условия помех, при которых происходит потеря фиксированного решения GNSS RTK, а также и сформулировать практические рекомендации по организации измерений и их постобработке в условиях многолучевости при экранировании. Записанные наборы измерений в формате RINEX используются для тестирования приемов пространственной фильтрации сигналов от спутников ГНСС, оказавшихся в условиях естественных и искусственных помех, и призваны выявить, каким образом постобработка способна компенсировать снижение точности, вызванное помехами экранирования.

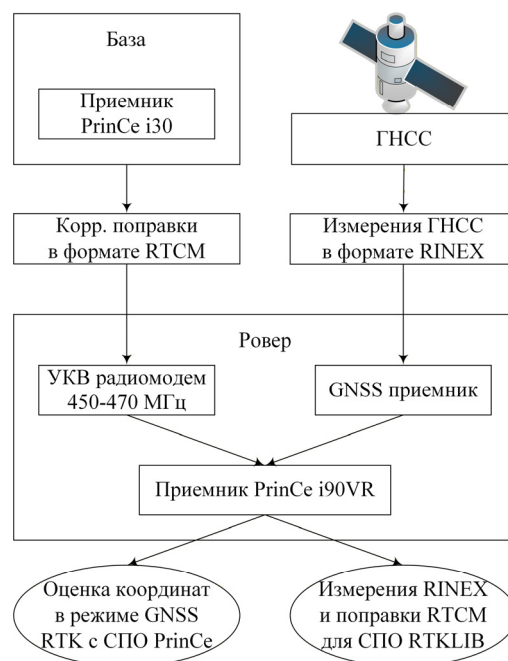


Рис. 2. Схема экспериментальной оценки точности ровера

Для оценки точности позиционирования GNSS RTK в условиях помех в сценариях OLOS, WLOS для сравнения используется опорный сценарий с идеальными условиями прямой видимости LOS между приемником PrinCe i90VR и спутниками ГНСС: измерения ГНСС характеризовались открытым небом, отсутствием строений и преград [27]. В рассматриваемых далее сценариях OLOS и WLOS производится сравнение ОК, полученных напрямую с СПО приёмника PrinCe i90VR, а также рассчитанных в результате постобработки измерений в библиотеке RTKLIB. Для постобработки в RTKLIB записывались первичные измерения от базовой станции (PrinCe i30) и ровера (PrinCe i90VR) в формате RINEX. Для оценки точности были выбраны следующие параметры: СКО оценок координат, полученное с использованием метода скользящего окна, статус решения, количество спутников, горизонтальный фактор снижения точности HDOP. Запись ОК велась во дворе СПбГУТ 10 декабря 2025 года на интервале пять минут.

3 Анализ сценария OLOS

3.1 Условия эксперимента в сценарии OLOS

Сценарий OLOS воспроизводит работу GNSS RTK в условиях интенсивной многолучевости при частичном экранировании приемной антенны ровера металлической решеткой. Рис. 3 иллюстрирует условия проведения эксперимента в сценарии OLOS. Металлическая решётка размещалась параллельно земле на высоте 20 см над антенной приёмника PrinCE I90VR. Такая конфигурация частично перекрывает прямые сигналы, вызывая их рассеяние, дифракцию и формирование многолучевости.



Рис. 3. Условия эксперимента в сценарии OLOS

3.2 Оценка координат PrinCe в сценарии OLOS

На рис. 4 представлена зависимость СКО ОК по широте и долготе для сценария OLOS: СКО по широте достигает 0,25-0,3 м, тогда как по долготе не превышает 0,1 м.

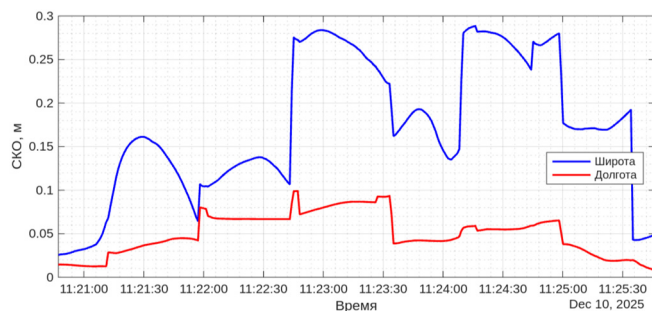


Рис. 4. СКО широты и долготы ОК PrinCe в сценарии OLOS

На рис. 5 показано изменение высоты относительно времени измерений: периодически возникают скачки до $\pm 8-9$ м. Такие резкие изменения высоты свидетельствуют о нестабильности решения ОК по высоте и совпадают с переходами приёмника в менее точные режимы.



Рис. 5. СКО высоты ОК PrinCe в сценарии OLOS

На рис. 6 представлена зависимость статуса решения PrinCe по координатам от времени записи: основную часть времени приёмник работал в режиме RTK Fix, обеспечивая наивысшую точность оценок координат; тем не менее периодически фиксируются переходы в режим No Fix, которые сопровождаются появлением выбросов СКО ОК, что свидетельствует о нестабильности фазового разрешения.

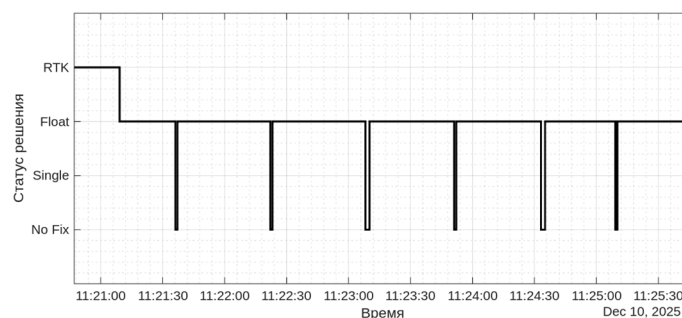


Рис. 6. Статус решения PrinCe в сценарии OLOS

На рис. 7 показана зависимость количества видимых спутников приёмником PrinCe за время записи; их количество сохраняется на стабильно высоком уровне, составляя в среднем 33, что благоприятно для высокоточного ОМП. Однако наблюдались и кратковременные спады, в ходе которых число видимых спутников снижалось до 24-26.

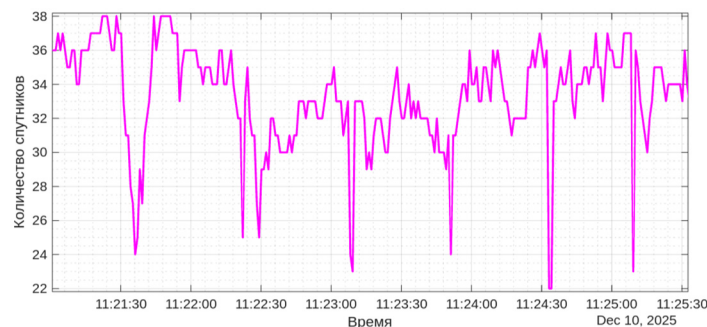


Рис. 7. Количество видимых спутников PrinCe в сценарии OLOS

На рис. 8 показана зависимость HDOP оценок координат относительно времени. Значения HDOP, в основном, находятся в диапазоне 0,45–0,55, что соответствует хорошей геометрии ГНСС. Отдельные скачки HDOP до 0,7 совпадают по времени с ростом СКО ОК, однако в целом уровень HDOP остаётся низким, что подтверждает благоприятные условия наблюдений, и что даже если сигналы спутников находятся не в прямой видимости, приёмнику PrinCe все равно удастся поддерживать точность на достаточно высоком уровне.

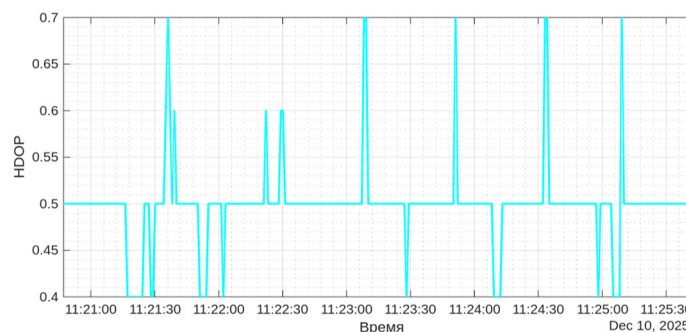


Рис. 8. HDOP ОК PrinCe в сценарии OLOS

Результаты ОК PrinCe в сценарии OLOS демонстрируют снижение точности по сравнению с эталонным сценарием LOS, несмотря на формально благоприятные условия. СКО по широте и долготе измеряется дециметрами; СКО по высоте доходит до 8-9 м.

Наблюдается нестабильность работы приёмника: режим RTK-Fix систематически сменяется состоянием No Fix, что коррелирует с пиками СКО. Количество видимых спутников остается высоким (33), а HDOP сохраняется в диапазоне 0,45–0,55. Однако даже кратковременное снижение числа спутников до 24–26 единиц, сопровождаемые отдельными скачками HDOP до 0,7, приводит к существенным смещениям в ОК.

3.3 Оценка координат RTKLIB в сценарии OLOS

На рис. 9 представлена зависимость СКО ОК по широте, долготе и высоте от времени в сценарии OLOS. СКО показывает резкое снижение в начале интервала, что отражает интервал сходимости постобработки в RTKLIB. После этого СКО стабилизируется на уровне около 0,1–0,2 м по горизонтали и несколько выше по высоте. Несмотря на формально низкие значения СКО, фактические смещения ОК остаются значительными, что указывает на наличие систематической ошибки.

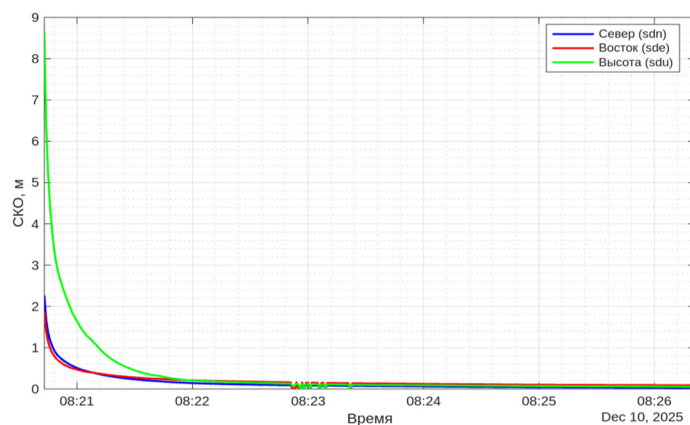


Рис. 9. СКО широты и долготы ОК RTKLIB в сценарии OLOS

На рис. 10 представлена зависимость статуса решения RTKLIB от времени записи. Анализ графика показывает, что решение по ОК преимущественно находилось в режиме Float. Решения RTK-Fix возникают крайне редко и имеют кратковременный характер. Отсутствие устойчивого режима RTK-Fix объясняет значительные ошибки оценок координат.

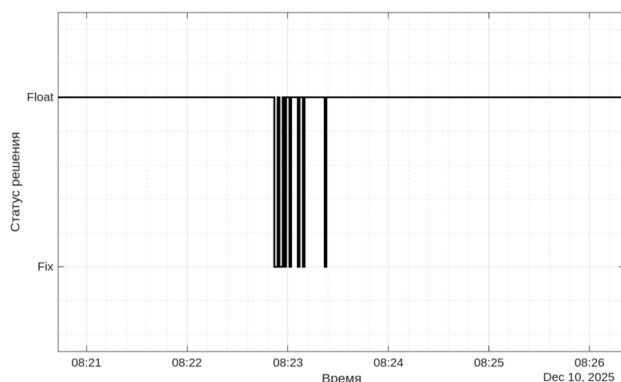


Рис. 10. Статус решения RTKLIB в сценарии OLOS

На рис. 11 показано число спутников, используемых RTKLIB; их число лежит в диапазоне 4–11. В отдельные моменты наблюдается резкое снижение числа спутников, что негативно сказывается на геометрии созвездия ГНСС и приводит к снижению точности ОК.

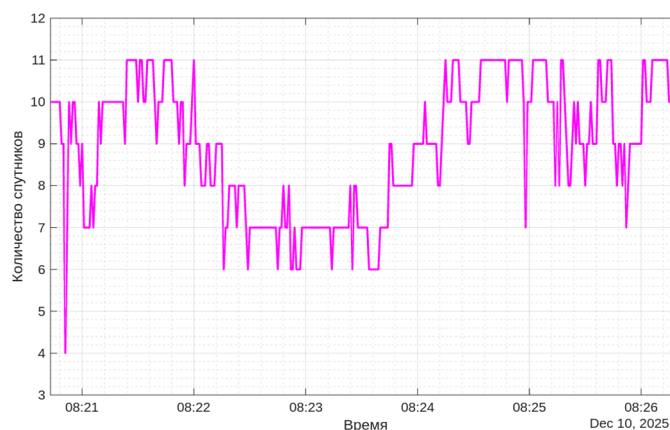


Рис. 11. Количество видимых спутников RTKLIB в сценарии OLOS

Результаты постобработки в RTKLIB в условиях частичного экранирования металлической решеткой в сценарии OLOS демонстрируют снижение возможности восстановления высокоточных оценок координат. Несмотря на стабилизацию СКО на уровне 0,1–0,2 м, ОК содержат значительные систематические смещения; проблемной является высота. Причиной низкой точности является характер режима позиционирования: на протяжении всего интервала постобработки решение практически постоянно находится в режиме Float. Это указывает на неспособность алгоритмов надежно разрешить фазовые неоднозначности в условиях экранирования. Дополнительным фактором выступает недостаточное число спутников. Таким образом, постобработка в RTKLIB не смогла компенсировать влияние частичного экранирования металлической решеткой.

3.4 Сравнение решений PrinCe и RTKLIB в сценарии OLOS

На рис. 12 и 13 показано сравнение смещения ОК PrinCe и RTKLIB по широте и долготе соответственно. Анализ графиков показывает разницу в поведении решений PrinCe и RTKLIB: кривая PrinCe остаётся близкой к нулю на протяжении всего интервала и демонстрирует небольшие колебания в пределах дециметров; решение RTKLIB, напротив, характеризуется отклонениями на несколько метров, а также резкими выбросами в десятки метров.

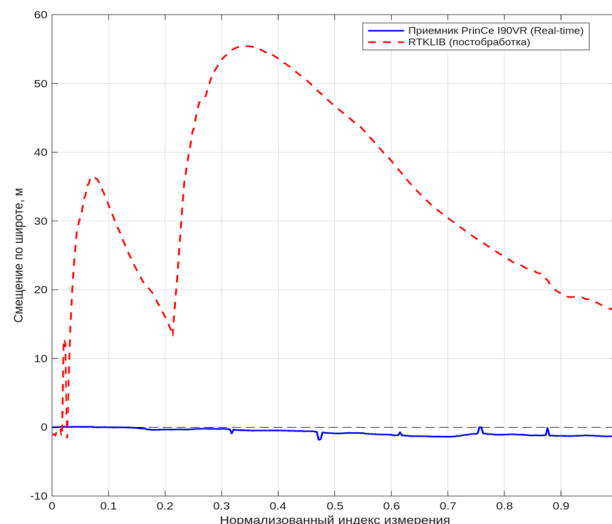


Рис. 12. Сравнение ОК по широте PrinCe и RTKLIB в OLOS

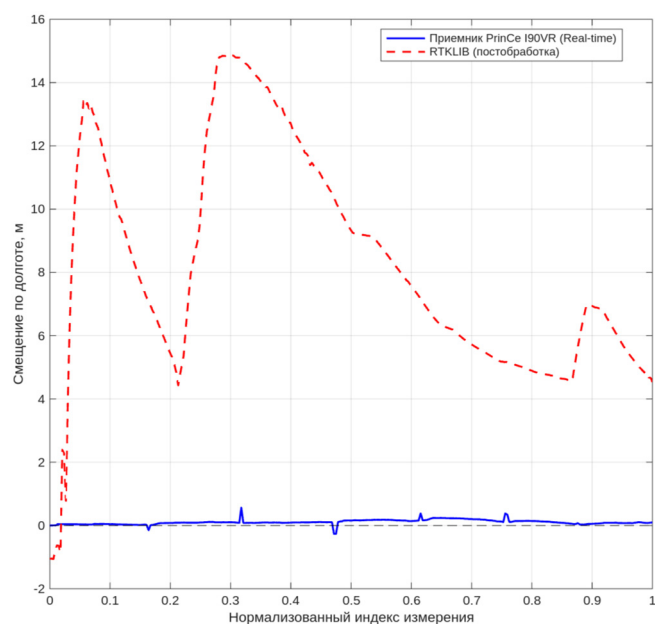


Рис. 13. Сравнение ОК по долготе PrinCe и RTKLIB в OLOS

Сравним ОК PrinCe и RTKLIB на плоскости на рис. 14. Анализ графиков показывает, что ОК PrinCe формируют компактное облако вокруг опорной точки. ОК RTKLIB в постобработке значительно смещены и имеют вытянутую форму, отражающую смещение в десятки метров.

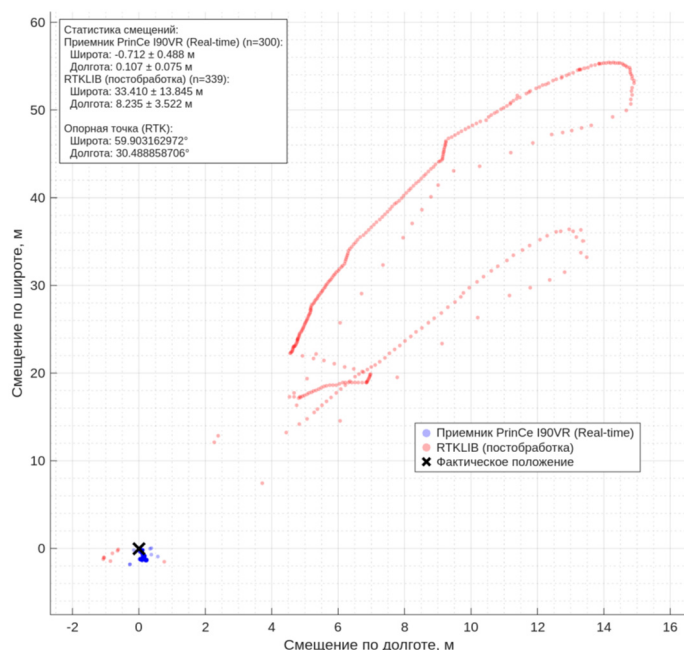


Рис. 14. Сравнение оценок координат PrinCe и RTKLIB в OLOS

3.5 Выводы по сценарию OLOS

Из анализа результатов, полученных приемником PrinCe и путем постобработки в RTKLIB в сценариях OLOS в условиях частичного экранирования, можно сделать вывод о близости ОК PrinCe к эталонной точке и заметном смещении ОК, полученных при постобработке в RTKLIB. Алгоритмы работы устройств геодезического класса PrinCe справляются с обработкой первичных измерений на порядок лучше, чем

работа открытой библиотеки RTKLIB с параметрами по умолчанию. Для повышения точности постобработки в устройствах GNSS RTK потребительского сегмента нужна предварительная пространственная фильтрация спутников, являющихся источником многолучевости.

4 Анализ сценария WLOS

4.1 Условия эксперимента в сценарии WLOS

Сценарий WLOS воспроизводит работу GNSS RTK при частичном отсутствии прямой видимости с затенением одной стороны приемной антенны ровера по заданному азимутальному направлению стеной WLOS (Wall LOS). Рис. 15 иллюстрирует условия эксперимента в сценарии WLOS.



Рис. 15. Условия эксперимента в сценарии WLOS

4.2 Оценка координат PrinCe в сценарии WLOS

Из рис. 16 следует, что СКО по широте достигает 0,25 м, тогда как по долготе не превышает 0,15 м.

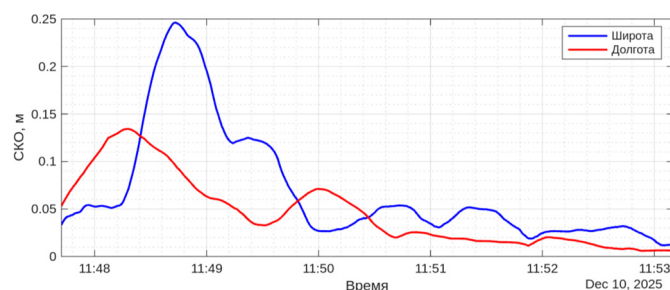


Рис. 16. СКО широты и долготы ОК PrinCe в сценарии WLOS

Из рис. 17 следует, что изменения высоты незначительны, однако присутствует единичный 0,6 м, совпадающий с переходом режима, что типично для RTK-алгоритмов.

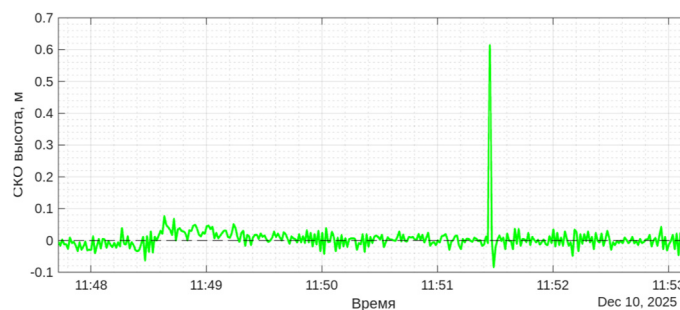


Рис. 17. СКО высоты ОК PrinCe в сценарии WLOS

На рис. 18 представлена зависимость статуса решения PrinSe. Из анализа следует преобладание Float-решений на протяжении большей части наблюдений и появление RTK-фиксации лишь в конце. Это объясняет повышенные ошибки и дрейф ОК в начале эксперимента и подтверждает, что статистика смещений в целом формировалась в режиме Float.

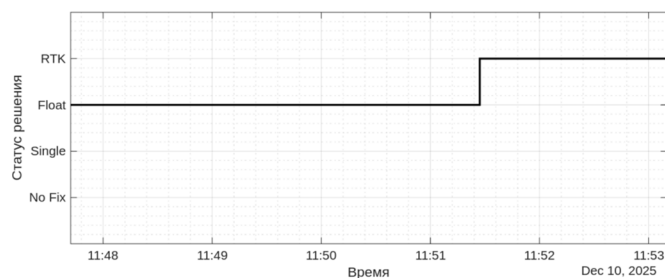


Рис. 18. Статус решения PrinSe в сценарии WLOS

Из рис. 19 следует что значения HDOP в диапазоне 0,6-1,4 характеризуют удачную геометрию созвездия спутников.

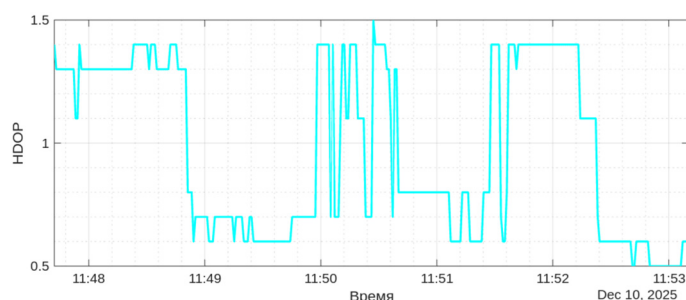


Рис. 19. HDOP ОК PrinSe в сценарии WLOS

Ключевым фактором, определившим качество решения на протяжении большей части эксперимента, является статус позиционирования. Доминирование режима Float объясняет повышенные ошибки и наблюдаемый дрейф координат в начале записи. Появление и закрепление RTK-фиксации лишь к концу интервала измерений напрямую связано с улучшением всех метрик точности. Геометрию спутникового созвездия, оцениваемую через HDOP (0,6-1,4), можно считать удачной. Однако наблюдалась корреляция между всплесками HDOP, уменьшением количества используемых спутников и ростом СКО ОК. Таким образом, даже при отсутствии прямого экранирования, близость крупного отражающего объекта (стена) приводит к многолучевости, которая препятствует быстрой и устойчивой фиксации целочисленных неоднозначностей фазы. Это выражается в длительном пребывании решения в режиме Float и увеличении ошибок на плоскости. Результаты указывают на то, что наличие близко расположенных препятствий является фактором, снижающим надежность высокоточного RTK-позиционирования, даже при сохранении хороших формальных показателей спутниковой геометрии.

4.3 Оценка координат RTKLIB в сценарии WLOS

На рис. 20 представлена зависимость СКО ОК по широте, долготе и высоте от времени в сценарии WLOS. Анализ графиков показывает четкую зависимость точности от времени и условий наблюдений. Стандартное отклонение по широте и высоте находится на уровне 0,25-0,33 м и постепенно

снижается к концу интервала, тогда как СКО по долготе остается существенно ниже и практически неизменным. Это подтверждает, что долгота в данном наборе данных определяется наиболее стабильно, а высота и широта вносят основной вклад в общую погрешность.

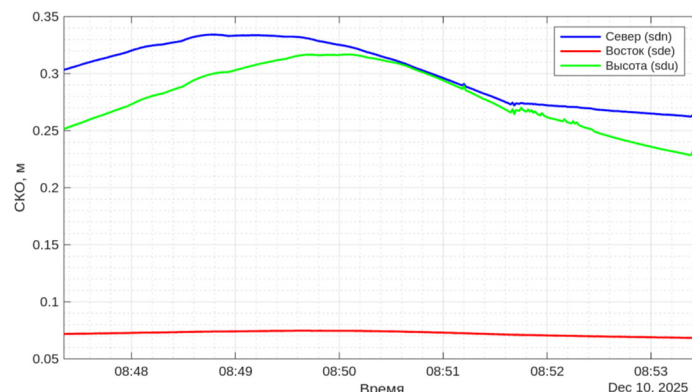


Рис. 20. СКО широты и долготы ОК RTKLIB в сценарии OLOS

На рис. 21 представлена зависимость статуса решения RTKLIB от времени записи. Анализ графика показывает, что на протяжении всего интервала получались Float-решения, что объясняет систематические смещения и высокие СКО.

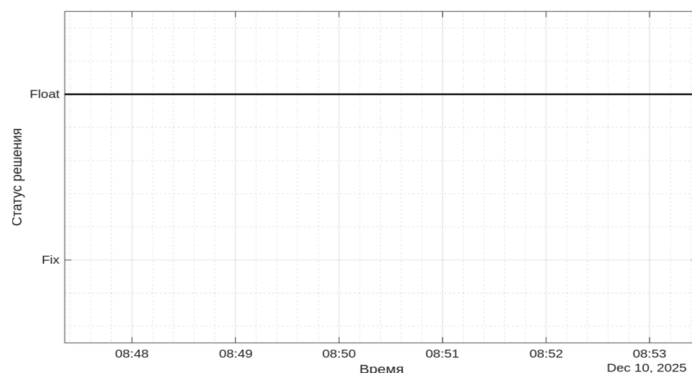


Рис. 21. Статус решения RTKLIB в сценарии WLOS

На рис. 22 показано число спутников, используемых RTKLIB. Анализ графика показывает работу с 8-9 спутниками. Отсутствие значительных скачков указывает на стабильное наблюдение созвездия ГНСС, однако само число спутников невелико, что является одной из причин невозможности получения фиксированного RTK-решения.

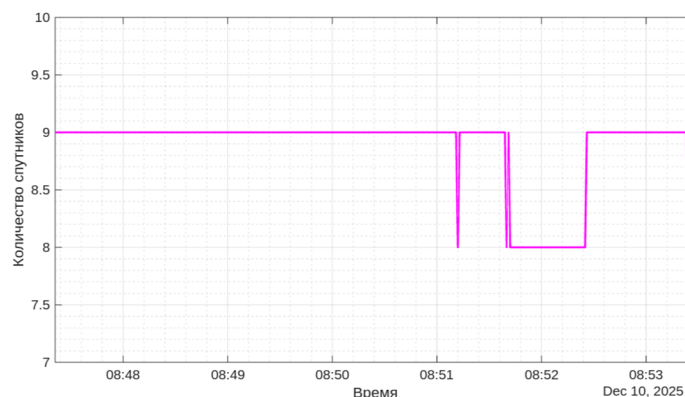


Рис. 22. Количество видимых спутников RTKLIB в сценарии WLOS

Результаты постобработки данных сценария WLOS в RTKLIB демонстрируют значительное снижение точности по сравнению с эталонными условиями. Анализ показывает рост СКО по широте и высоте до 0,25-0,33 м. На протяжении всей обработки сохранялся статус Float, что указывает на неспособность разрешения фазовых неоднозначностей в условиях интенсивной многолучевости, создаваемой близко расположенной стеной. Количество используемых спутников оставалось стабильным, но ограниченным (8-9 шт.), что в сочетании с неблагоприятным влиянием отраженных от стены сигналов препятствовало повышению точности ОК. Таким образом, постобработка в RTKLIB не обеспечила компенсации влияния крупного препятствия.

4.4 Сравнение решений PrinCe и RTKLIB в сценарии WLOS

На рис. 23 и 24 показано сравнение смещения ОК PrinCe и RTKLIB по широте и долготе соответственно.

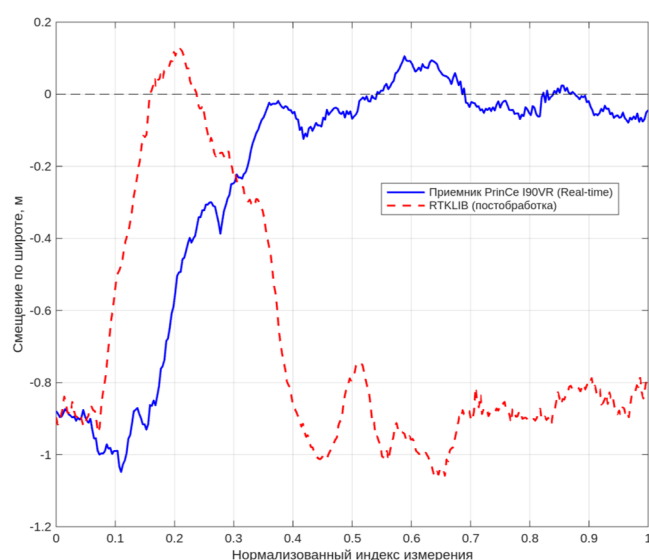


Рис. 23. Сравнение ОК по широте PrinCe и RTKLIB в WLOS

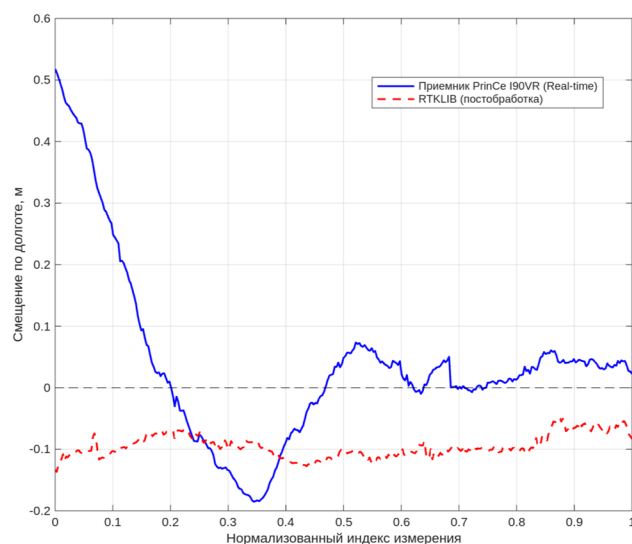


Рис. 24. Сравнение ОК по долготе PrinCe и RTKLIB в WLOS

Для ОК PrinCe наблюдается заметный переходный процесс, после которого смещение стремится к нулю; это указывает на компенсацию систематических ошибок при наличии

достаточного числа спутников. ОК RTKLIB в постобработке демонстрирует более резкие колебания и устойчивое смещение, что свидетельствует о наличии систематической ошибки, сохраняющейся на всем интервале наблюдений. Сравним ОК PrinCe и RTKLIB на плоскости на рис. 25. Анализ показывает, что ОК PrinCe формируют компактное облако вокруг истинного местоположения. ОК RTKLIB смещены от опорной точки и имеют вытянутую форму, отражающую смещение в десятки дециметров.

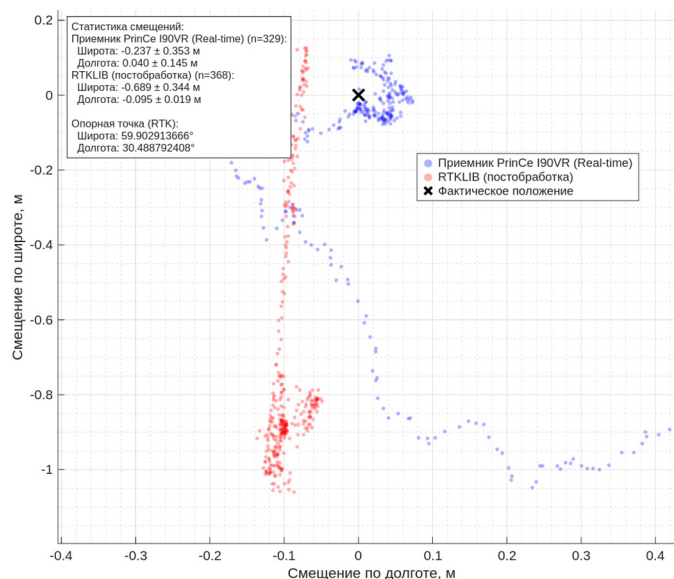


Рис. 25. Сравнение оценок координат PrinCe и RTKLIB в WLOS

4.5 Выводы по сценарию WLOS

На основании проведенного сравнительного анализа работы приёмника PrinCe в реальном времени и постобработки в RTKLIB в условиях открытого неба вблизи стены WLOS сформулированы следующие выводы. Оба метода демонстрируют отклонение от эталонной точности сценария LOS, однако особенности отклонений различны. Решение PrinCe характеризуется выраженным переходным процессом и дрейфом, но с последующей стабилизацией вблизи нулевого смещения. Постобработка в RTKLIB показывает систематически смещённое решение.

Решение PrinCe демонстрирует способность к адаптации и компенсации систематических ошибок, вызванных многолучевостью от близкой стены. После начального переходного периода, связанного со сходимостью, приёмник обеспечивает удержание смещений по широте и долготе вблизи нуля. Это свидетельствует об эффективности встроенных алгоритмов фильтрации, позволяющих нивелировать негативное влияние стационарного бокового отражателя при удачной геометрии спутников.

В отличие от приёмника PrinCe, постобработка в RTKLIB не смогла устранить устойчивое систематическое смещение по обоим горизонтальным координатам. Сохранение нефиксированного решения Float на всём интервале и стабильное отрицательное смещение указывают на то, что стандартные алгоритмы RTKLIB не компенсируют фазовые искажения, вызванные многолучевостью от стены. ОК RTKLIB смещены относительно истинного местоположения, что ограничивает их практическую применимость.

5 Пути повышения точности позиционирования систем GNSS RTK в условиях NLOS и OLOS

5.1 Постановка задачи

Из проведенного экспериментального исследования возможностей позиционирования систем GNSS RTK в сценариях LOS, NLOS [27], OLOS и WLOS можно сделать следующие выводы. В условиях прямой видимости LOS ровером более 30 спутников получается миллиметровая точность оценок координат в режиме RTK-Fix с HDOP=0,5. Полное и частичное экранирование антенны ровера приводит к снижению точности OK до дециметров и метров соответственно со статусом решения Float или DGPS и увеличением HDOP. При этом постобработка в RTKLIB с настройками по умолчанию компенсировать эффекты многолучевости оказалась неспособна.

Для повышения точности оценок координат при постобработке в RTKLIB, по сравнению с проприетарными алгоритмами PrinCe, на входе библиотеки RTKLIB целесообразно использовать предварительную пространственную фильтрацию сигналов ГНСС следующим образом. Первичные измерения от спутников, которые в текущий момент времени находятся в условиях прямой видимости LOS с ровером отправлять непосредственно на вход RTKLIB, а первичные измерения от спутников, которые в текущий момент времени с большой вероятностью, согласно сценарию, находятся в условиях полного или частичного отсутствия прямой видимости NLOS, OLOS и WLOS в постобработке не использовать. Далее рассмотрим выборочную обработку сигналов ГНСС по заданному диапазону углов места, азимутов и совместную пространственную фильтрацию по азимуту и углу места.

5.2 Предложения по пространственной фильтрации по углу места

Ранее было показано, что в сценарии NLOS со сплошным металлическим экраном над антенной ровера наблюдается значительное снижение точности оценок координат RTKLIB при настройках по умолчанию [27]. Для повышения точности рассмотрим пространственную фильтрацию данных RINEX от спутников ГНСС по их углу места с использованием настроек фильтра исходных данных (ИД) RTKLIB на рис. 26.

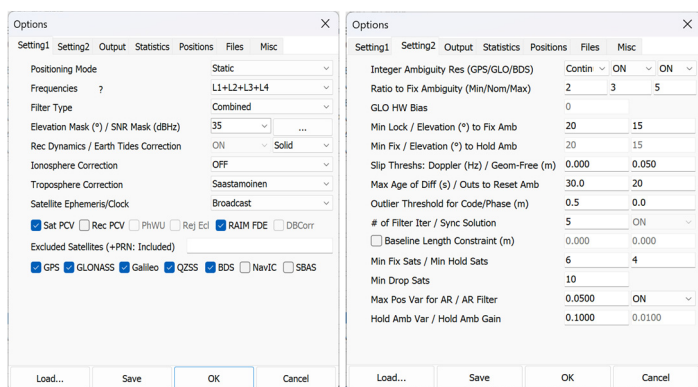


Рис. 26. Настройки фильтров исходных данных в RTKLIB

В сценарии NLOS металлический экран, расположенный непосредственно над приемной антенной [27], приводит к многолучевости сигналов от спутников на средних и высоких углах места. Сигналы спутников с углами места примерно от 45 до 90 градусов приходят после переотражений, что

приводит к смещению псевдодальностных и фазовых измерений. Стандартные настройки RTKLIB ориентированы на отсеечение низкоэлевационных спутников с углом места ниже 5-15 градусов, где основными источниками ошибок являются атмосферные эффекты и отражения от земли. Однако в сценарии NLOS низкоэлевационные спутники, чьи сигналы не экранируются, могут оставаться относительно «чистыми». Основной же источник ошибок сосредоточен в области высоких углов, которые традиционно считаются наиболее благоприятными для измерений. RTKLIB не предоставляет возможности задать верхнюю границу маски или, что более важно, исключить определенный диапазон углов места, например, от 45 до 90 градусов. Таким образом, алгоритм вынужден принимать в обработку все измерения от спутников выше установленного нижнего порога, включая те, что наиболее вероятно искажены металлическим экраном.

В данном сценарии использование параметра отношения сигнал/шум (ОСШ) для фильтрации сигналов ГНСС оказывается неэффективным, поскольку экран может не столько ослаблять, сколько переотражать сигнал, оставляя ОСШ высоким. В результате этим ошибочным, но формально «хорошим» по уровню сигнала данным присваивается значительный вес при постобработке, что приводит к смещению оценок координат и ошибочному разрешению целочисленных фазовых неоднозначностей.

Для снижения смещения ОК в сценарии NLOS и OLOS предлагается использовать алгоритм пространственной фильтрации по углу места, представленный на рис. 27.

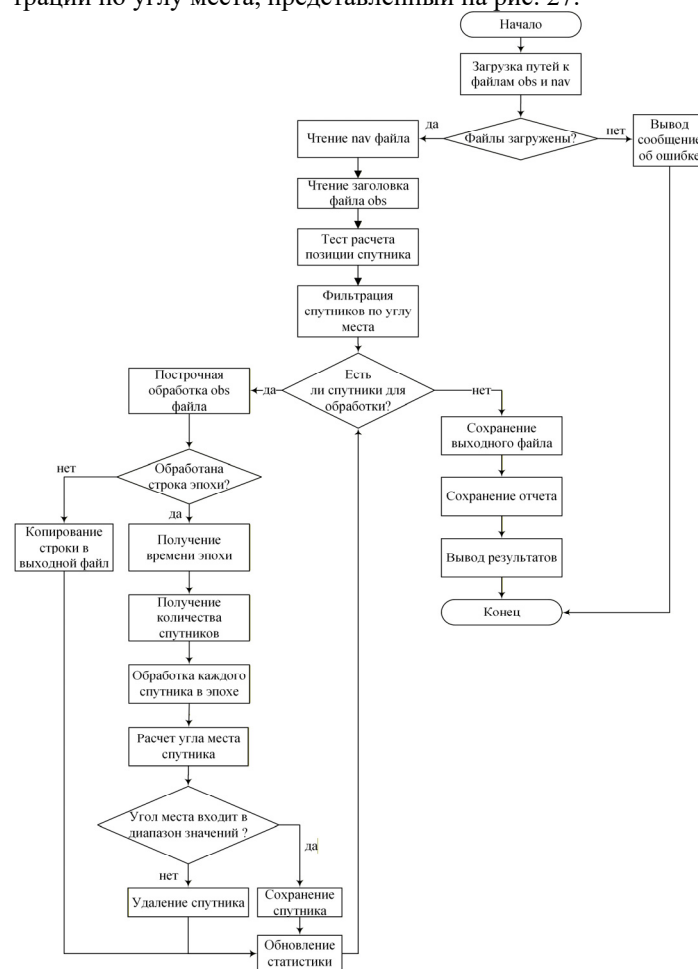


Рис. 27. Алгоритм пространственной фильтрации по углу места

Для постобработки в RTKLIV была реализована программная реализация алгоритма на Python для сигналов GPS. Алгоритм начинает работу с загрузки и проверки существования указанных входных RINEX-файлов: файла наблюдений .obs и файла эфемерид .nav. При успешной проверке инициализируется обработчик, который последовательно обрабатывает эфемеридные данные, а затем считывает заголовок .obs - файла для определения координат приемника. После расчета позиций спутников алгоритм переходит к основному циклу обработки данных. Для каждой эпохи наблюдений извлекается метка времени и список спутников; далее для каждого спутника из эфемерид вычисляются его координаты и угол места относительно приемника.

Спутники, угол места которых не попадает в заданный диапазон, помечаются на удаление из текущей эпохи. Модифицированные данные эпохи записываются в выходной файл, а удаляемые измерения – во вспомогательный отчет. После обработки всех эпох сохраняются итоговые файлы. Функции и математические операции алгоритма фильтрации представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1
Функции алгоритма фильтрации по углу места

Функция	Назначение	Входные параметры	Выходные параметры	Особенности
datetime_to_gps_seconds(dt)	Преобразование даты в секунды GPS-эпохи	dt: datetime	float (секунды)	Начало отсчета: 1980-01-06
parse_epoch_time(epoch_line)	Поиск строки времени эпохи из RINEX	epoch_line: str	datetime	Обрабатывает секунды с плавающей точкой
calculate_satellite_elevation(sat_ecef, rec_ecef)	Расчет угла места спутника	sat_ecef: [x,y,z], rec_ecef: [x,y,z]	float (градусы)	Прямой геометрический расчет, 0°=горизонт, 90°=зенит
RinexNavParser	Анализатор навигационных файлов RINEX	path: str (путь к файлу)	-	Поддержка RINEX 3.04
sat_pos_broadcast_gps(eph, t)	Расчет позиции спутника GPS	eph: list, t: float	np.array([x,y,z])	Реализация уравнений движения Кеплера
RinexObsProcessor	Процессор наблюдений и фильтрации	obs_path, nav_path: str	-	Основной класс программы
parse_header(self, lines)	Анализ заголовка OBS файла	lines: list	int (индекс конца заголовка)	Извлечение координат приемника
test_satellite_positions(self)	Тестирование расчетов позиций	-	-	Проверка корректности эфемерид
filter_by_elevation(self, max_el, min_el)	Основная фильтрация спутников	max_el, min_el: float	str (путь к файлу)	Удаляет спутники вне диапазона углов
save_elevation_report(self)	Сохранение отчета	-	-	Создание текстового отчета
main()	Главная функция программы	-	-	Главная часть программы

Таблица 2
Операции алгоритма фильтрации по углу места

Функция	Формула	Описание	Операция в программе
Расчет среднего движения	$n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}$ $n = n_0 + \Delta n$	Номинальное и скорректированное движение	sat_pos_broadcast_gps
Уравнение Кеплера	$M_k = M_0 + n \cdot t_k$ $E_k = M_k + e \cdot \sin E_k$	Итеративное решение для эксцентрической аномалии	итерации в sat_pos_broadcast_gps

Истинная аномалия	$\sin v_k = \frac{\sqrt{1-e^2} \cdot \sin E_k}{1-e \cdot \cos E_k}$ $\cos v_k = \frac{\cos E_k - e}{1-e \cdot \cos E_k}$	Преобразование через эксцентрическую аномалию	sat_pos_broadcast_gps
Коррекции орбиты	$\Delta u_k = C_{u0} \cdot \cos 2\varphi_k + C_{u2} \cdot \sin 2\varphi_k$ $\Delta r_k = C_{r0} \cdot \cos 2\varphi_k + C_{r2} \cdot \sin 2\varphi_k$	Гармонические поправки	коррекции в sat_pos_broadcast_gps
Угол места	$\theta = 90^\circ - \arccos\left(\frac{r \cdot d}{ r \cdot d }\right)$ $d = \text{sat} - \text{rec}$	Геометрический расчет	calculate_satellite_elevation
Преобразование в ECEF	$x = x' \cdot \cos \Omega - y' \cdot \sin \Omega$ $y = x' \cdot \sin \Omega + y' \cdot \cos \Omega$ $z = y' \cdot \sin i$	Из орбитальной в земную систему координат	финальный расчет в sat_pos_broadcast_gps

5.3 Предложения по пространственной фильтрации по азимуту

В ряде сценариев пространственная фильтрация исключительно по углу места может оказаться недостаточно эффективной, и тогда нужно рассмотреть пространственную фильтрацию по азимуту. Идея фильтрации по азимуту заключается в исключении из решения навигационной задачи измерений от спутников, направление на которые совпадает с направлением на препятствие в заданном сценарии. Например, при расположении ровера вблизи стены в сценарии WLOS целесообразно исключить из постобработки первичные измерения ГНСС от тех спутников, которые экранируются стороной этой стены по азимуту. Рассмотрим алгоритм пространственной фильтрации на рис. 28.

Реализованный алгоритм позволяет модифицировать файлы наблюдений RINEX, обнуляя отношения сигнал/шум SNR для спутников, попадающих в заданный азимутальный сектор, что исключает использование их измерений в дальнейшей постобработке в RTKLIV. Алгоритм начинает работу с загрузки и проверки существования указанных пользователем входных RINEX-файлов: файла наблюдений .obs и файла навигационных эфемерид .nav.

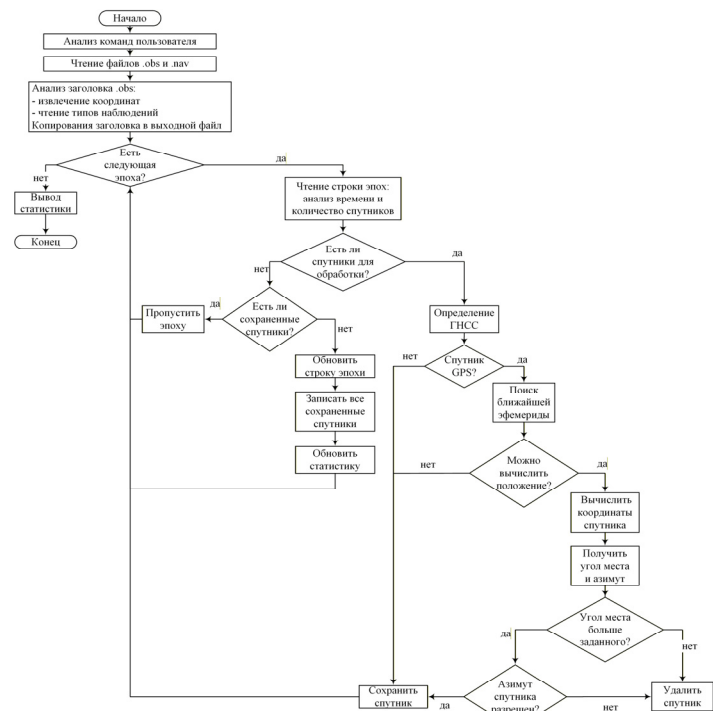


Рис. 28. Алгоритм пространственной фильтрации по азимуту

При успешной проверке инициализируется парсер навигационных данных, который последовательно считывает все эфемериды GPS и сохраняет их в структурированном виде. Затем выполняется чтение заголовка .obs файла для определения типа наблюдений и координат приёмника. После предварительной обработки программа переходит к основному циклу по эпохам наблюдений.

Для каждой эпохи извлекается метка времени, список видимых спутников и соответствующие им измерения. Для каждого спутника системы 'G' на основе эфемерид вычисляются его координаты в глобальной геоцентрической системе ECEF, затем выполняется преобразование в топоцентрическую систему координат ENU относительно приёмника и рассчитываются угол места и азимут.

Спутники, не удовлетворяющие заданным условиям (максимальный угол места, разрешённые или исключённые сектора азимута), помечаются для фильтрации. Вместо полного удаления строк измерений программа модифицирует поля SNR (наблюдения типа «S*») для таких спутников, устанавливая значение 10.001, что служит маркером исключения при последующей обработке в RTKLIB; данное решение обосновано тем, что при неаккуратном изменении файлов наблюдений могут возникнуть ошибки в чтении при оценке координат. При последующей постобработке в RTKLIB активируется штатный фильтр “SNR Mask” с пороговым значением. Поскольку модифицированные спутники имеют SNR ниже порога, они автоматически отбрасываются RTKLIB на этапе загрузки и не участвуют в вычислении координат, что эквивалентно их полному исключению из навигационного решения. Все прочие данные сохраняются без изменений. После обработки всех эпох формируется выходной файл наблюдений с той же структурой, что и исходный, но с изменёнными значениями SNR для отфильтрованных спутников. Также предусмотрена опция формирования отладочного .csv файла с информацией об угле места, азимуте и решении о фильтрации для каждого спутника в каждой эпохе. Функции алгоритма фильтрации по азимуту представлены в таблице 3.

Таблица 3

Функции алгоритма фильтрации по азимуту

Функция	Назначение
RinexNavParser3	Анализ навигационного RINEX-файла (формат 3.04). Извлекает эфемериды GPS и сохраняет их в виде объектов GPSEphemeris.
GPSEphemeris	Класс для хранения параметров эфемерид GPS и вычисления координат спутника методом position_ecef().
RinexObsFilter	Основной класс фильтрации. Содержит методы для анализа заголовка OBS, чтения эпох, расчёта угла места/азимута, модификации SNR и записи результата.
parse_az_spec	Преобразует строковое описание секторов азимута (например, "0-90,180-270") в список интервалов.
ecef_to_geodetic	Преобразует координаты ECEF в геодезические широту, долготу и высоту относительно эллипсоида WGS84.
ecef_to_enu_matrix	Формирует матрицу поворота для перехода от ECEF к топоцентрической системе ENU в точке приёмника.
azel_for_sat	Вычисляет азимут и угол места спутника по его эфемеридам и координатам приёмника.
should_keep	Проверяет, удовлетворяет ли спутник критериям фильтрации (угол места и азимут). Возвращает True/False.
_set_snr_fields	Заменяет значения полей SNR для заданного спутника на 10.001, сохраняя исходное форматирование строк.
filter_and_write	Основной метод, выполняющий фильтрацию всего файла наблюдений и запись результата.
main	Точка входа: обрабатывает аргументы командной строки, инициализирует парсер и фильтр, запускает обработку.

5.4 Проверка пространственной фильтрации по углу места

Рассмотрим пространственную фильтрацию спутников с высокими значениями угла места. Данный подход актуален для рассмотренного ранее сценария NLOS [27] и OLOS. На начальном этапе в расчет не принимаются спутники, находящиеся вблизи зенита, например, в диапазоне от 90 до 85 градусов. Далее порог отсекается последовательно понижается: сначала исключаются спутники от 90 до 80 градусов, затем от 90 до 75 и так далее, шаг за шагом расширяя «мертвую зону» в верхней полусфере (рис. 29).

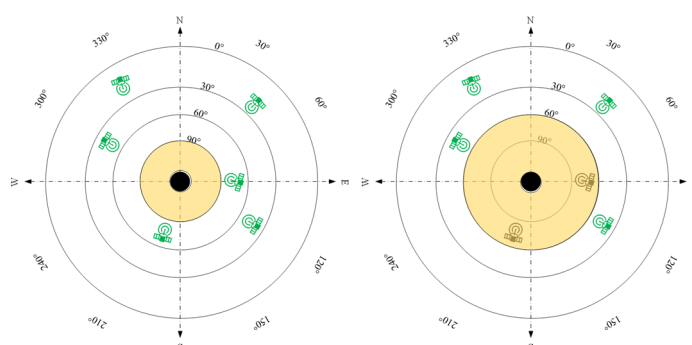


Рис. 29. Порядок пространственной фильтрации по углу места

Для каждой итерации выполняется вычисление ОК из набора измерений оставшихся спутников и рассчитывается СКО. Целью перебора является поиск такого порога отсека по углу места, при котором СКО достигает своего минимума. В таблице 4 представлены СКО при итеративном переборе пороговых значений шага по углу места для рассмотренного ранее сценария NLOS.

Указанный в таблице шаг означает верхнюю границу исключаемой зоны: значение “5” соответствует отбрасыванию спутников, находящихся в диапазоне углов места от 90 до 85 градусов, то есть оставляются спутники с углом места менее 85°; значение “10” – от 90 до 80 градусов, и так далее, вплоть до порога “85”, при котором исключаются спутники с углами от 90 до 5 градусов, и в расчете остаются лишь спутники вблизи горизонта.

Таблица 4

СКО при фильтрации по углу места в сценарии NLOS

Шаг °	СКО			
	2D, м	Широта, м	Долгота, м	Высота, м
5	8,799	5,010	1,765	18,933
10	8,799	5,010	1,765	18,933
15	8,799	5,010	1,765	18,933
20	8,801	5,011	1,765	18,933
25	9,383	5,490	1,771	18,967
30	7,976	4,582	1,875	19,580
35	8,558	6,256	2,505	29,482
40	6,122	4,136	1,404	14,434
45	6,585	3,215	2,773	17,524
50	8,335	2,016	4,001	19,234
55	8,165	3,634	3,080	12,018
60	8,165	3,634	3,080	12,018
65	8,165	3,634	3,080	12,018
70	8,165	3,634	3,080	12,018
75	8,186	3,665	3,074	12,125
80	8,046	3,843	2,652	9,460
85	8,046	3,843	2,652	9,460

Анализ результатов позволяет выделить порог в 40 градусов сверху (от 0 до 50°) как наилучший с точки зрения минимизации горизонтальной ошибки. При данном пороге отсеечения (исключение спутников с углами от 90 до 50 градусов и работа с теми, чей угол места ниже 50°) было достигнуто минимальное значение СКО на плоскости 6.122 метра. Интересно отметить, что дальнейшее увеличение исключаемой зоны приводит к нестабильности решения, увеличению HDOP и, как следствие, ухудшению сходимости решения. На рис. 30 представлены ОК RTKLIB для сценария NLOS. Выполнено сравнение исходного решения, и решения после применения пространственной фильтрации по углу места с порогом 40 градусов. После фильтрации разброс оценок координат стал меньше примерно в полтора раза.

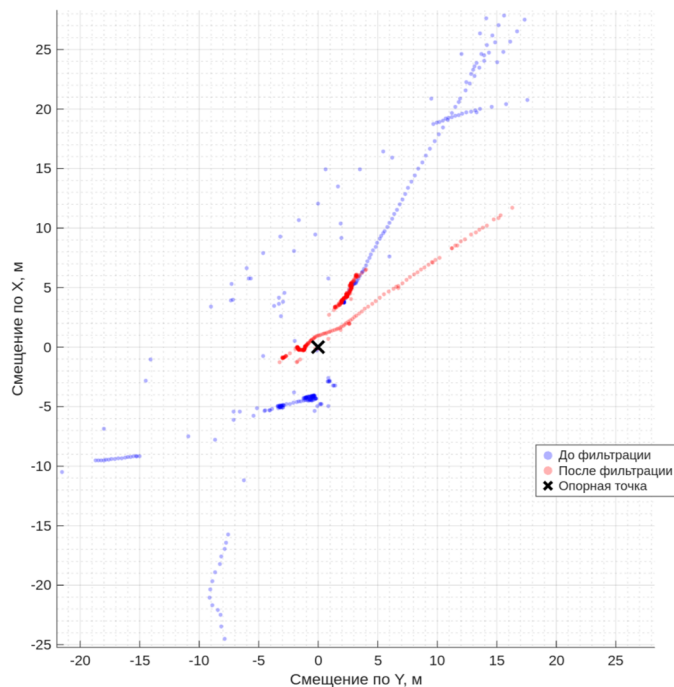


Рис. 30. ОК RTKLIB до и после фильтрации по углу места

5.5 Проверка пространственной фильтрации по азимуту

Аналогичный принцип поиска минимума СКО ОК по набору измерений может быть реализован и для фильтрации по азимуту. Данный подход актуален для сценариев экранирования стеной с одной из сторон WLOS. В предположении, что стена препятствовала приему сигналов ГНСС полностью с одной стороны, использовался метод скользящего сектора в 180°. В отличие от фильтрации по углу места, где исключалась верхняя полусфера, в данном подходе приемник учитывает только те спутники, чьи азимуты попадают в определенный диапазон. Первоначально задается сектор наблюдения 180 градусов, ориентированный от 0 до 180 градусов. Для набора спутников в этом секторе рассчитывается СКО. Затем этот сектор последовательно смещается по азимуту с шагом 10 градусов, охватывая диапазоны 10–190°, 20–200° и т.д. до тех пор, пока сектор не вернется в исходное положение (рис. 31). Для каждого сектора выполняется расчет ОК и СКО. Наиболее удачной считается такая ориентация азимутального сектора, которая обеспечивает наименьшее СКО.

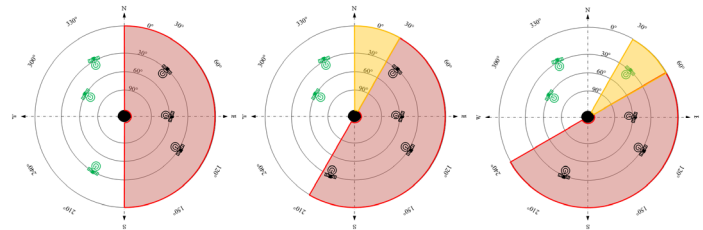


Рис. 31. Порядок пространственной фильтрации по азимуту

Для исследования пространственной фильтрации по азимуту использовался набор измерений из сценария WLOS. В таблице 5 представлены СКО при итеративном переборе пороговых значений шага по азимуту. Для каждой пары границ сектора (нижняя и верхняя) приведены значения СКО.

Таблица 5

СКО при фильтрации по азимуту в сценарии WLOS

Нижняя граница °	Верхняя граница °	СКО			
		2D, м	Широта, м	Долгота, м	Высота, м
0	180	6,211	1,826	0,283	3,410
10	190	6,211	1,826	0,283	3,410
20	200	6,211	1,826	0,283	3,410
30	210	6,211	1,826	0,283	3,410
40	220	6,211	1,826	0,283	3,410
50	230	6,211	1,826	0,283	3,410
60	240	6,211	1,826	0,283	3,410
70	250	6,211	1,826	0,283	3,410
80	260	6,211	1,826	0,283	3,410
90	270	6,211	1,826	0,283	3,410
100	280	5,312	0,599	0,065	1,640
110	290	5,048	1,089	0,189	2,230
120	300	4,834	0,436	0,189	1,039
130	310	4,834	0,436	0,189	1,039
140	320	4,834	0,436	0,189	1,039
150	330	4,834	0,436	0,189	1,039
160	340	4,834	0,436	0,189	1,039
170	350	4,834	0,436	0,189	1,039
180	0	4,834	0,436	0,189	1,039
190	10	4,834	0,436	0,189	1,039
200	20	4,834	0,436	0,189	1,039
210	30	4,834	0,436	0,189	1,039
220	40	4,834	0,436	0,189	1,039
230	50	4,834	0,436	0,189	1,039
240	60	4,834	0,436	0,189	1,039
250	70	4,834	0,436	0,189	1,039
260	80	4,834	0,436	0,189	1,039
270	90	4,834	0,436	0,189	1,039
280	100	6,564	0,967	0,165	1,654
290	110	5,629	1,428	0,163	1,709
300	120	6,211	1,826	0,283	3,410
310	130	6,211	1,826	0,283	3,410
320	140	6,211	1,826	0,283	3,410
330	150	6,211	1,826	0,283	3,410
340	160	6,211	1,826	0,283	3,410
350	170	6,211	1,826	0,283	3,410

Найденный в ходе калибровки азимутальный сектор сохраняет эффективность в течение ограниченного интервала времени, пока геометрия созвездия не претерпевает изменений. Для продолжительных сценариев может потребоваться периодическое обновление маски, что может быть реализовано путем повторения процедуры калибровки в фоновом режиме без прерывания основного потока позиционирования. Анализ данных в таблице 16 позволяет выделить несколько характерных зон. Первые десять положений сектора (от 0-180 до 90-270, выделены желтым) демонстрируют высокую горизонтальную ошибку на уровне 6,211 метра, что говорит о неудачном направлении приема.

Начиная с сектора 100-280 градусов наблюдается улучшение точности: горизонтальное СКО снижается до 5,312 метра. Наилучший результат достигается при установке сектора в диапазоне от 120 до 300 градусов, где СКО в 2D падает до минимального значения 4,834 метра. Отметим, что данное решение не является единственным: сектора с границами 120-300, 130-310 и до 270-90 (выделено зеленым) также образуют набор удачных направлений приема. Остальные направления можно считать экранированными стеной. На рис. 32 представлены ОК RTKLIB для сценария WLOS. Выполнено сравнение исходного решения, и решения после пространственной фильтрации по азимуту с исключением направления на стену. После фильтрации разброс оценок координат стал меньше примерно в полтора раза.

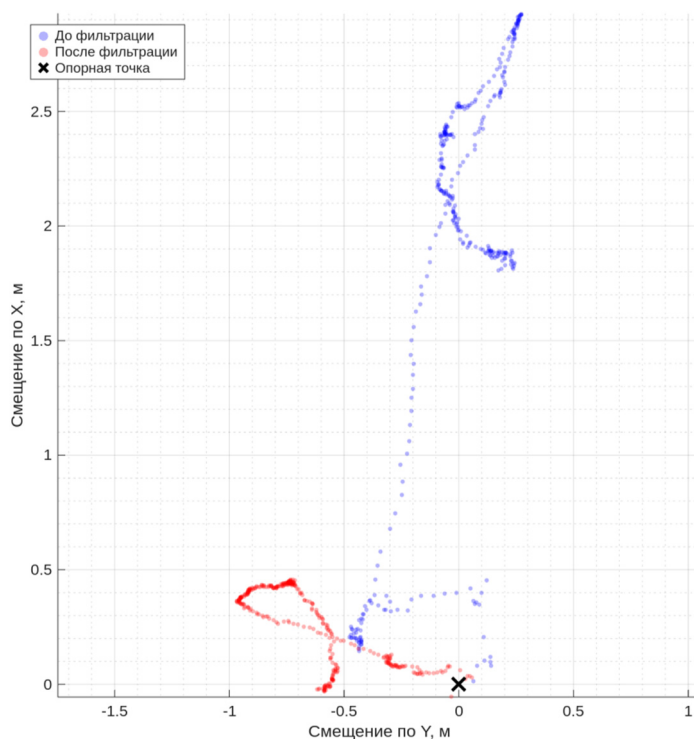


Рис. 32. ОК RTKLIB до и после фильтрации по азимуту

5.6 Предложения по совместной пространственной фильтрации по азимуту и углу места

В основе совместной пространственной лежит анализ заранее собранного массива измерений ГНСС в формате RINEX с итеративным исключением спутников по критерию заданного азимута и угла места. Описанные выше подходы могут быть реализованы совместно. Совместная пространственная фильтрация по азимуту и углу места предполагает последовательное или одновременное применение ограничений как по углу места, так и по азимуту. Например, можно сначала исключить спутники с высоким углом места, а затем, среди оставшихся, искать наиболее удачный азимутальный сектор, или же перебирать все возможные комбинации обоих параметров. Однако такая совместная фильтрация нетривиальна с вычислительной точки зрения. На рис. 33 представлен пример совместной работы с фильтрацией и по углу места, и по азимуту.

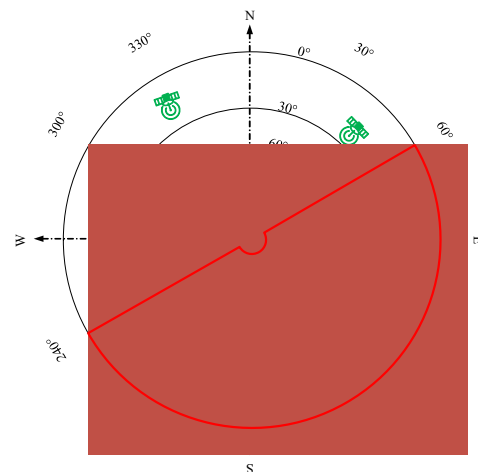


Рис. 33. Порядок совместной пространственной фильтрации

6 Выводы

В результате экспериментального исследования точности позиционирования систем GNSS RTK для сценариев LOS, NLOS в [27] и OLOS, WLOS выполнено сравнение точности оценок координат, полученных как непосредственно из программно-аппаратного комплекса геодезического класса, так и в результате постобработки первичных измерений ГНСС в библиотеке с открытым исходным кодом RTKLIB. Показано, что предварительная пространственная фильтрация первичных измерений по азимуту и углу места позволяет примерно в полтора раза повысить точность позиционирования по сравнению с постобработкой RTKLIB по умолчанию. Экспериментально обоснованный подход пространственной фильтрации по азимуту и углу места в сценариях NLOS, OLOS и WLOS может быть реализован в устройствах GNSS RTK потребительского сегмента без использования антенных решеток для кратного повышения точности позиционирования. Предложенный подход пространственной фильтрации измерений по азимуту и углу места может быть реализован программно на внешнем вычислителе (смартфоне, планшете), сопряженном с RTK-ровером, и требует лишь короткого (2-3 минуты) этапа начальной калибровки для определения оптимальной маски под текущее созвездие спутников. После одной настройки фильтра обработка координат производится в реальном времени с использованием стандартных RTK алгоритмов. Важно подчеркнуть, что предложенный подход не требует изменения аппаратной части потребительских GNSS RTK-приёмников. В типовой архитектуре современных RTK-систем, где первичные измерения передаются на внешнее вычислительное устройство (смартфон, планшет) для обработки, реализация пространственной фильтрации сводится к добавлению программного модуля предварительной селекции спутников. Кратковременный этап калибровки (2-3 минуты) в начале сеанса ОМП позволяет определить наиболее удачную для текущего сценария измерений и созвездия ГНСС конфигурацию фильтра, после чего позиционирование осуществляется в реальном времени с повышенной (по сравнению с настройками по умолчанию) точностью. Таким образом, метод сохраняет все преимущества режима RTK и может быть интегрирован в существующие программные комплексы без существенного увеличения времени подготовки к измерениям.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации по теме: «Разработка фрагмента модельной гибридной орбитально-наземной сети связи и проведение прикладных научных исследований на её базе», соглашение № 071-03-2026-010.

Литература

1. Kassas Z. Z. M., Maaref M., Morales J. J., Khalife J. J., Shamei K. Robust Vehicular Localization and Map Matching in Urban Environments Through IMU, GNSS, and Cellular Signals // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. 2020. Vol. 12. № 3. P. 36-52.
2. Фокин Г.А., Волгушев Д.Б., Харин В.Н. Использование SDR технологии для задач сетевого позиционирования. Формирование опорных сигналов LTE // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №5. С. 28-47.
3. Фокин Г. А. Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 1. Конфигурация сигналов PRS // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 2. С. 48-63.
4. Фокин Г. А. Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 2. Обработка сигналов PRS // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3. С. 80-99.
5. Фокин Г.А., Багаев Е.С., Мещеряков Д.Е. Позиционирование в беспроводных локальных сетях Wi-Fi стандарта IEEE 802.11az. Часть 1. Постановка задачи достижения дециметровой точности // Первая мила. 2025. № 1 (125). С. 50-56.
6. Фокин Г.А. Разработка и оценка методов позиционирования приемо-передатчиков в системах когнитивного радио 6G // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №6. С. 4-20.
7. Фокин Г.А. Разработка и оценка методов позиционирования приемопередатчиков 6G в ближней зоне // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №8. С. 4-20.
8. Фокин Г.А., Владыко А.Г. Позиционирование транспортных средств в сверхплотных сетях радиодоступа V2X/5G с использованием расширенного фильтра Калмана // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 4. С. 45-59.
9. Фокин Г.А., Владыко А.Г. Позиционирование транспортных средств с комплексированием дальномерных, угломерных и инерциальных измерений в расширенном фильтре Калмана // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 2. С. 51-67.
10. Фокин Г.А., Мещеряков Д.Е. Обзор возможностей программно-аппаратного комплекса PrinCe для высокоточного позиционирования методом RTK // Экономика и качество систем связи. 2025. № 3 (37). С. 77-95.
11. Grewal M. S., Andrews A. P., Bartone C. G. Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration, 4th ed. Wiley, 2020. 608 p.
12. Real Time Kinematics. NAVIPEDIA [Электронный ресурс]. URL: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Real_Time_Kinematics (Дата обращения 06.04.2026).
13. Odolinski R., Teunissen, P.J. Low-cost, high-precision, single-frequency GPS-BDS RTK positioning // GPS solutions. 2017. Vol. 21. № 3. P. 1315-1330.
14. Приемник PrinCe i30. // АО «ПРИН». [Электронный ресурс]. URL: https://www.prin.ru/gnss/prince/priemnik_prince_i30vr/ (Дата обращения 06.04.2026).
15. Контроллер PrinCe HCE620. // АО «ПРИН». [Электронный ресурс]. URL: https://prin.ru/kontrollery/prince/kontroller_prince_hce600/ (Дата обращения 06.04.2026).
16. Приемник PrinCe i90VR. [Электронный ресурс] // АО «ПРИН». URL: https://www.prin.ru/gnss/prince/priemnik_prince_i90_vr/ (Дата обращения 06.04.2026).
17. SparkFun RTK Surveying Kit // SparkFun Electronics. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sparkfun.com/sparkfun-rtk-surveying-kit.html> (Дата обращения 06.04.2026).
18. RTKLIB: An Open-Source Program Package for GNSS Positioning // Tomoji Takasu. [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/tomojitakasu/RTKLIB> (Дата обращения 06.04.2026).
19. RINEX // [Электронный ресурс]. URL: <https://igs.org/wg/rinex/> (Дата обращения 06.04.2026).
20. Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rtc.org/> (Дата обращения 06.04.2026).
21. Ntrip - Networked Transport of RTCM via Internet Protocol // Federal Agency for Cartography and Geodesy. [Электронный ресурс]. URL: <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/> (Дата обращения 06.04.2026).
22. NMEA Manual // SparkFun Electronics. [Электронный ресурс]. URL: https://cdn.sparkfun.com/assets/a/3/2/f/a/NMEA_Reference_Manual-Rev2.1-Dec07.pdf (Дата обращения 06.04.2026).
23. Геоспаyder // ООО «НПП «ГЕОМАТИК». [Электронный ресурс]. URL: <https://geospider.ru/> (Дата обращения 06.04.2026).
24. Фокин Г. А. Позиционирование в условиях отсутствия прямой видимости с использованием цифровых моделей местности // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 11. С. 4-13.
25. Фокин Г. А., Аль-Одхари А. Х. Обработка РДМ измерений для позиционирования с использованием беспилотных летательных аппаратов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 7. С. 52-58.
26. Хья Х. К., Фокин Г. А. Комплексное исследование точности позиционирования устройств в сетях LTE в условиях отсутствия прямой видимости // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №8. С. 13-28.
27. Meshcheryakov D., Fokin G. Experimental Study of GNSS RTK Accuracy in LOS and NLOS Scenario // 2026 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 10-12 March. 2026. P. 1-6
28. Bian Y., Cao S., Wang G., Qin X., Hu M., Qin H. A Stable RTK/MEMS-IMU Tightly-Coupled Algorithm Under Differential Corrections Outage // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2025. Vol. 74. № 8. P. 12895-12906.
29. Lu W., Luo Y., Guo C., Jiang W. An Iterated Equivariant Filter and Its Application in Tightly Coupled SINS/GNSS Integrated Navigation // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2025. Vol. 74. P. 1-14. Art no. 9518314.
30. Yang Y.-S., Jan S.-S. Enhanced Single Station PPP-RTK using CNES SSR Correction // 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Salt Lake City, UT, USA, 28 April - 01 May. 2025. P. 481-485.
31. Wang R., Blanch J., Walter T. Overbounding Time-correlated Errors for a Multi-constellation Precise Point Positioning Integrity Service // 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Salt Lake City, UT, USA, 28 April - 01 May. 2025. P. 235-243.
32. Hu J., Li P., Feng J., Zhou F., Yi D., Bisnath S. Enhancing Smartphone Relative Positioning With Partial Wide-Lane Ambiguity Resolution: Path to Real-Time, Decimeter-Level Positioning in User Environments // IEEE Internet of Things Journal. 2025. Vol. 12. № 3. P. 3177-3187.
33. Ruwisch F., Schön S. Feature Map Aided Robust High Precision GNSS Positioning in Harsh Urban Environments // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2025. Vol. 26. № 9. P. 13721-13733.
34. Chen C., Ge Y., Zhao X., Hu C., Yang X., Yu X. Improving Single-Frequency Multi-GNSS RTK/INS Tightly Coupled Integration by Mixing Time-Differenced and Double-Differenced Carrier Phase for Vehicle-Borne Positioning // IEEE Internet of Things Journal. 2025. Vol. 12. № 6. P. 6696-6707.
35. Huang J. et al. Pedestrian Navigation Using Waist-Mounted IMU and RTK // IEEE Sensors Journal. 2025. Vol. 25. № 3. P. 5510-5519.
36. Liu X., Ballal T., Al-Naffouri T.Y. Performance Analysis of

Antenna Array-Aided RTK Positioning // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2025. Vol. 61. № 2. P. 5325-5336.

37. *Chun J. et al.* Performance Evaluation of the Latest Smartphones and Smartwatch Using GNSS Raw Measurements // 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Salt Lake City, UT, USA, 28 April - 01 May. 2025. P. 1527-1535.

38. Smartphone Decimeter Challenge. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ion.org/gnss/googlecompetition.cfm> (Дата обращения 06.04.2026).

39. Differential GNSS. [Электронный ресурс]. URL: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Differential_GNSS (Дата обращения 06.04.2026).

40. PPK – Post Processing Kinematic. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sbg-systems.com/glossary/ppk-post-processing-kinematic/> (Дата обращения 06.04.2026).

41. Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sbg-systems.com/technology/ambiguity-resolution-in-precise-point-positioning/> (Дата обращения 06.04.2026).

42. *Grosch A., Crespillo O.G.* Robust Railway Ground Truth and Confidence Bounds Estimation based on RTK/INS Forward-Backward Smoothing // 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Salt Lake City, UT, USA, 28 April - 01 May. 2025. P. 1336-1347.

43. *Dampf J., Bochkathi M., Pany T.* RTK performance of synthetic aperture processing on top of the ULB-PLL method with real-world urban GPS/Galileo L1/L5 signals // 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Salt Lake City, UT, USA, 28 April -

01 May. 2025. P. 1226-1238.

44. *Фокин Г. А.* Особенности функционирования территориально-распределенных самоорганизующихся сетей радиосвязи с адаптивными антенными системами // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2009. Том 3. №1. С. 20-22.

45. *Фокин Г. А., Волгушев Д. Б.* Модели пространственной селекции при диаграммообразовании на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона // Компьютерные исследования и моделирование. 2024. Т. 16. № 1. С. 195-216.

46. *Степанец И.В., Фокин Г.А., Мюллер А.* Способы оценки пропускной способности систем massive MIMO // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Том 12. №10. С. 64-69

47. *Wang R. et al.* RTK-LIO: Tightly Coupled RTK/LiDAR/Inertial Navigation System Based on Optimization Approach // IEEE Sensors Journal. 2025. Vol. 25. № 13. P. 26220-26227.

48. *Spanghero M., Papadimitratos P.* UnReference: analysis of the effect of spoofing on RTK reference stations for connected rovers // 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Salt Lake City, UT, USA, 28 April - 01 May. 2025. P. 316-327.

49. *Cai Y., Cheng P., Meng X., Tang W., Shi C.* Using network RTK corrections and low-cost GPS receiver for precise mass market positioning and navigation applications // 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Baden-Baden, Germany, 05-09 June. 2011. P. 345-349.

50. *Фокин Г.А., Аль-Одхари А.Х.* Позиционирование подвижных источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Том 11. №4. С. 41-46.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE POSITIONING ACCURACY OF GNSS RTK SYSTEMS

Grigoriy A. Fokin, *The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia,*
grihafokin@gmail.com, fokin.ga@sut.ru

Anton O. Tishkov, *The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia,*
anton.tishkov.2000@mail.ru

The study was carried out with financial support from the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation on the topic: "Development of a fragment of a model hybrid orbital-ground communications network and conducting applied scientific research based on it," agreement No. 071-03-2026-010.

Abstract

Despite significant advances in terrestrial cellular network (4G LTE, 5G NR), and WiFi wireless local area network (WLAN) location services in recent years, centimeter-accurate real-time positioning services across federal geographic areas are currently available exclusively through global navigation satellite systems (GNSS) with differential correction systems (DCS). The most widely used GNSS systems are those with Real Time Kinematic (RTK) DCS. Geodetic-grade GNSS RTK hardware and software systems (HSS) with subscriptions to reference base station network services, in addition to high-quality hardware for receiving primary measurements, operate using proprietary software implementing highly efficient secondary post-processing algorithms, enabling millimeter-accurate coordinate estimates (CAE) in real time. In addition to high line-of-sight (LOS) accuracy, survey-grade GNSS RTK systems effectively compensate for multipath effects in full NLOS (Non-LOS) or partial Obstructed-LOS (OLOS) scenarios, where there is no direct line of sight between the rover antenna and GNSS satellites. More affordable and mass-produced consumer GNSS RTK devices cannot achieve comparable accuracy in either LOS or NLOS scenarios. Improving the positioning accuracy of consumer GNSS RTK systems by postprocessing primary GNSS measurements in the RTKLIB open-source library is a pressing and sought-after task. This paper presents an experimental study of the positioning accuracy of GNSS RTK systems using the PrinCe survey-grade software package. Coordinate estimates are obtained both directly from PrinCe and by postprocessing primary measurements in RTKLIB. The following parameters are analyzed: the root mean square deviation (RMS) of coordinate estimates, the number of satellites used, and the geometric factor of accuracy dilution. The aim of the study is to identify and substantiate ways to improve the positioning accuracy of GNSS RTK systems through postprocessing in RTKLIB in the absence of a partial line of sight (OLOS). The study demonstrated that preliminary spatial filtering of primary measurements by azimuth and elevation angle improves positioning accuracy compared to default postprocessing in RTKLIB. For the first time, for OLOS scenarios, a comparison was performed of the accuracy of coordinates obtained both directly from a geodetic-class hardware and via postprocessing in RTKLIB. The theoretical significance lies in the experimental substantiation of spatial filtering by azimuth and elevation angle in OLOS scenarios. The practical significance of the study lies in improving the positioning accuracy of consumer GNSS RTK systems without the use of antenna arrays.

Keywords: GNSS RTK, NMEA, RINEX, RTCM, PrinCe, RTKLIB, LOS, NLOS, OLOS, positioning.

References

- [1] Z. Z. M. Kassas, M. Maeref, J. J. Morales, J. J. Khalife, K. Shamei, "Robust Vehicular Localization and Map Matching in Urban Environments Through IMU, GNSS, and Cellular Signals," in *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 36-52.
- [2] G. A. Fokin, D. B. Volgushev, V. N. Kharin, "Development of SDR-based network positioning technology. LTE reference signals generation," *T-Comm*, 2022, vol. 16, no.5, pp. 28-47.
- [3] G. A. Fokin, "Model of 5G NR network positioning technology with meter accuracy. Part 1. PRS signal configuration," in *Proc. of Telecom. Universities*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 48-63.
- [4] G. A. Fokin, "Model of 5G NR network positioning technology with meter accuracy. Part 2. PRS signal processing," in *Proc. of Telecom. Universities*, 2022, vol. 8, no. 3, pp. 80-99.
- [5] G. A. Fokin, E. S. Bagaev, D. E. Meshcheryakov, "Positioning in IEEE 802.11az Wireless Local Area Networks. Part 1. Statement of the Problem of Achieving Decimeter Accuracy," in *The Last Mile*, 2025, no. 1 (125), pp. 50-56.
- [6] G. A. Fokin, "Development and evaluation of transceiver positioning methods in 6G cognitive radio systems," in *T-Comm*, 2024, vol. 18, no.6, pp. 4-20.
- [7] G. A. Fokin, "Development and evaluation of 6G transceiver positioning methods in the near field," *T-Comm*, 2024, vol. 18, no.8, pp. 4-20.
- [8] G. A. Fokin, A. G. Vladko, "Positioning of Vehicles in Ultra-Dense V2X/5G Radio Access Networks Using the Extended Kalman Filter," in *Proc. of Telecom. Universities*, 2020, vol. 6, no. 4, pp. 45-59.
- [9] G. A. Fokin, A. G. Vladko, "Positioning of Vehicles with the Fusion of Time of Arrival, Angle of Arrival and Inertial Measurements in the Extended Kalman Filter," in *Proc. of Telecom. Universities*, 2021, vol. 7, no. 2, pp. 51-67.
- [10] G. A. Fokin, D. E. Meshcheryakov, "Review of the capabilities of the PrinCe hardware and software complex for high-precision positioning using the RTK method," in *Economics and quality of communication systems*, 2025, no. 3 (37), pp. 77-95.
- [11] M. S. Grewal, A. P. Andrews, C. G. Bartone, *Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration*, 4th ed. Wiley, 2020. 608 p.
- [12] Real Time Kinematics. NAVIPEDIA. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Real_Time_Kinematics
- [13] R. Odolinski, P. J. Teunissen, "Low-cost, high-precision, single-frequency GPS-BDS RTK positioning," in *GPS solutions*, 2017, vol. 21, no 3, pp. 1315-1330.
- [14] PrinCe i30VR. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: https://www.prin.ru/gnss/prince/priemnik_prince_i30vr/
- [15] PrinCe HCE620. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: https://prin.ru/kontrollery/prince/kontroller_prince_hce600/
- [16] PrinCe i90VR. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: https://www.prin.ru/gnss/prince/priemnik_prince_i90_vr/
- [17] SparkFun RTK Surveying Kit. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/sparkfun-rtk-surveying-kit.html>
- [18] RTKLIB: An Open-Source Program Package for GNSS Positioning. Tomoji Takasu. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: <https://github.com/tomji-takasu/RTKLIB>

- [19] RINEX. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: <https://igs.org/wg/rinex/>
- [20] Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM). Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: <https://www.rtcn.org/>
- [21] Ntrip - Networked Transport of RTCM via Internet Protocol. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/>
- [22] NMEA Manual. SparkFun Electronics. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: https://cdn.sparkfun.com/assets/a/3/2/f/a/NMEA_Reference_Manual-Rev2.1-Dec07.pdf
- [23] Geospider. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: <https://geospider.ru/>
- [24] G. A. Fokin, "Positioning in conditions of no direct visibility using digital terrain models," *T-Comm*, 2019, vol. 13, no. 11, pp. 4-13.
- [25] G. A. Fokin, A. H. Al-Odhari, "Processing of RDM measurements for positioning using unmanned aerial vehicles," *T-Comm*, 2018, vol. 12, no. 7, pp. 52-58.
- [26] H. C. Hua, G. A. Fokin, "Comprehensive study of device positioning accuracy in LTE networks under non-line-of-sight conditions," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.8, pp. 13-28.
- [27] D. Meshcheryakov, G. Fokin, "Experimental Study of GNSS RTK Accuracy in LOS and NLOS Scenario," *2026 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russian Federation, 10-12 March. 2026. pp. 1-6.
- [28] Y. Bian, S. Cao, G. Wang, X. Qin, M. Hu and H. Qin, "A Stable RTK/MEMS-IMU Tightly-Coupled Algorithm Under Differential Corrections Outage," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2025, vol. 74, no. 8, pp. 12895-12906.
- [29] W. Lu, Y. Luo, C. Guo and W. Jiang, "An Iterated Equivariant Filter and Its Application in Tightly Coupled SINS/GNSS Integrated Navigation," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, vol. 74, pp. 1-14, art no. 9518314.
- [30] Y. -S. Yang and S. -S. Jan, "Enhanced Single Station PPP-RTK using CNES SSR Correction," *2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Salt Lake City, UT, USA, 2025, pp. 481-485.
- [31] R. Wang, J. Blanch and T. Walter, "Overbounding Time-correlated Errors for a Multi-constellation Precise Point Positioning Integrity Service," *2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Salt Lake City, UT, USA, 2025, pp. 235-243.
- [32] J. Hu, P. Li, J. Feng, F. Zhou, D. Yi and S. Bisnath, "Enhancing Smartphone Relative Positioning With Partial Wide-Lane Ambiguity Resolution: Path to Real-Time, Decimeter-Level Positioning in User Environments," in *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, vol. 12, no. 3, pp. 3177-3187.
- [33] F. Ruwisch and S. Sch?n, "Feature Map Aided Robust High Precision GNSS Positioning in Harsh Urban Environments," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025, vol. 26, no. 9, pp. 13721-13733.
- [34] C. Chen, Y. Ge, X. Zhao, C. Hu, X. Yang and X. Yu, "Improving Single-Frequency Multi-GNSS RTK/INS Tightly Coupled Integration by Mixing Time-Differenced and Double-Differenced Carrier Phase for Vehicle-Borne Positioning," in *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, vol. 12, no. 6, pp. 6696-6707.
- [35] J. Huang et al., "Pedestrian Navigation Using Waist-Mounted IMU and RTK," in *IEEE Sensors Journal*, 2025, vol. 25, no. 3, pp. 5510-5519.
- [36] X. Liu, T. Ballal and T. Y. Al-Naffouri, "Performance Analysis of Antenna Array-Aided RTK Positioning," in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2025, vol. 61, no. 2, pp. 5325-5336.
- [37] J. Chun et al., "Performance Evaluation of the Latest Smartphones and Smartwatch Using GNSS Raw Measurements," in *2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Salt Lake City, UT, USA, 28 April - 01 May, 2025, pp. 1527-1535.
- [38] Smartphone Decimeter Challenge. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: <https://www.ion.org/gnss/googlecompetition.cfm>
- [39] Differential GNSS. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Differential_GNSS
- [40] PPK - Post Processing Kinematic. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: <https://www.sbg-systems.com/glossary/ppk-post-processing-kinematic/>
- [41] Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning. Accessed: April 6, 2026. [Online]. Available: <https://www.sbg-systems.com/technology/ambiguity-resolution-in-precise-point-positioning/>
- [42] A. Grosch, O.G. Crespillo, "Robust Railway Ground Truth and Confidence Bounds Estimation based on RTK/INS Forward-Backward Smoothing," *2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Salt Lake City, UT, USA, 28 April - 01 May, 2025, pp. 1336-1347.
- [43] J. Dampf, M. Bochkathi, T. Pany, "RTK performance of synthetic aperture processing on top of the ULB-PLL method with real-world urban GPS/Galileo L1/L5 signals," *2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Salt Lake City, UT, USA, 28 April - 01 May, 2025, pp. 1226-1238.
- [44] G. A. Fokin, "Features of the functioning of geographically distributed self-organizing radio communication networks with adaptive antenna systems," *T-Comm*, 2009, vol. 3, no.1, pp. 20-22.
- [45] G. A. Fokin, D. B. Volgushev, "Models for spatial selection during location-Aware beamforming in ultra-dense millimeter wave radio access networks," in *Computer Research and Modeling*, 2024, vol. 16, no. 1, pp. 195-216.
- [46] I. V. Stepanets, G. A. Fokin, A. Mueller, "Capacity estimation ways of massive MIMO systems," *T-Comm*, 2018, vol. 12, no.10, pp. 64-69.
- [47] R. Wang et al., "RTK-LIO: Tightly Coupled RTK/LiDAR/Inertial Navigation System Based on Optimization Approach," in *IEEE Sensors Journal*, 2025, vol. 25, no. 13, pp. 26220-26227.
- [48] M. Spanghero, P. Papadimitratos, "UnReference: analysis of the effect of spoofing on RTK reference stations for connected rovers," *2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Salt Lake City, UT, USA, 28 April - 01 May, 2025, pp. 316-327.
- [49] Y. Cai, P. Cheng, X. Meng, W. Tang and C. Shi, "Using network RTK corrections and low-cost GPS receiver for precise mass market positioning and navigation applications," *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Baden-Baden, Germany, 2011, pp. 345-349.
- [50] G.A. Fokin, Abdulwahab Hussein Al-odhari, "Positioning of the moving radiation source using time difference of arrival method", *T-Comm*, vol. 11, no.4, pp. 41-46.

Information about authors:

Grigoriy A. Fokin, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Wireless Technologies and Systems of The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia. ORCID 0000-0002-5358-1895

Anton O. Tishkov, Assistant of the Department of Wireless Technologies and Systems of The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia