

СТАТЬИ

УДК 528.486.023

DOI 10.17513/use.38442

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ КИНЕМАТИКИ
В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВИРТУАЛЬНОЙ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ****Жимагулов Д.К.***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»,
Россия, Москва, e-mail: fazmatis@gmail.com;**ГБУ «Центр экспертиз, исследований и испытаний в строительстве», Россия, Москва*

В статье проведено исследование определения плановых координат с помощью спутникового оборудования в режиме кинематики в реальном времени, в том числе с использованием технологии виртуальной базовой станции. Целью статьи является определение средней квадратической погрешности определения плановых координат в режиме кинематики в реальном времени с использованием технологии виртуальной станции, а также определение средней квадратической погрешности виртуальной базовой станции; выявление зависимости между погрешностями определения плановых координат при холодном старте спутникового оборудования и при последовательном определении плановых координат (в рамках одного цикла наблюдений). В качестве полевых материалов рассмотрены 5 серий измерений в режиме кинематики в реальном времени и 3 серии измерений в режиме кинематики в реальном времени с использованием технологии виртуальной станции. В каждой серии измерений выполнено 3 цикла наблюдений, каждый цикл состоял из определения плановых координат трех точек. В результате исследований установлено, что использование технологии виртуальной станции уменьшает среднюю квадратическую погрешность определения плановых координат на 36% по сравнению с классическим режимом кинематики в реальном времени. Средняя квадратическая погрешность определения виртуальной базовой станции равна нулю. Существенной разницы между определением координат при холодном старте и при последовательном определении не установлено.

Ключевые слова: кинематика в реальном времени, технология виртуальной базовой станции, ровер, средняя квадратическая погрешность, спутники, геодезия

Благодарности: Автор выражает благодарность за ценные советы и наставления к.т.н., доценту МИИГАиК Насерреддину Х.Х. и начальнику отдела геодезического контроля ГБУ «ЦЭИИС» Соколову Н.Е.

**REAL-TIME KINEMATIC ACCURACY STUDY
USING A VIRTUAL BASE STATION****Zhimagulov D.K.***Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia, Moscow,
e-mail: fazmatis@gmail.com;**SBI "Center for Expertise, Research and Testing in Construction", Russia, Moscow*

In this article, studies have been conducted on the determination of planned coordinates using satellite equipment in real-time kinematics mode (including using virtual base station technology). The purpose of the article below is to determine the average square error of determining the planned coordinates in real-time kinematics mode using virtual station technology, and to determine the average square error of the virtual base station. Identification of the relationship between the error in determining the planned coordinates during the cold start of satellite equipment and the sequential determination of the planned coordinates (within the framework of one observation cycle). 5 series of measurements in real-time kinematics mode and 3 series of measurements in real-time kinematics mode using virtual station technology were considered as field materials. In each series of measurements, 3 observation cycles were performed, each observation cycle consisted of determining the planned coordinates of three points. As a result of the research, it was found that the use of virtual station technology reduces the average square error in determining the planned coordinates by 36% compared to the classical real-time kinematics mode, in turn, the average square error in determining the virtual base station is zero. There is no significant difference between the determination of coordinates at a cold start and at a sequential determination.

Keywords: real-time kinematics, virtual base station technology, average square error, rover, satellites, geodesy

Acknowledgements: The author expresses gratitude for valuable advice and guidance to PhD, Associate Professor MIIGAiK Nasereddin Kh.Kh. and Head of the Geodetic Control Department of the State Budgetary Institution «TsEiIS» Sokolov N.E.

Введение

В настоящее время широко распространено применение спутниковых технологий для решения геодезических задач. Одним из основных аргументов при выборе выше-

указанной технологии является экономия времени и трудозатрат. Наиболее популярным режимом измерений спутниковым оборудованием является кинематика в реальном времени (далее – RTK). Реализация

такого метода предполагает непрерывную связь со спутниковой группировкой, базовой станцией и ровером [1]. Ключевые преимущества RTK над другими режимами:

- использование дифференциальных поправок от базовых станций, что, в свою очередь, позволяет компенсировать влияние атмосферы при определении псевдодальности [2];

- возможность получения координат искомым точкой в режиме реального времени;

- отсутствие необходимости во втором комплекте спутникового оборудования, так как пользователь имеет возможность получить поправки от сетей базовых станций, доступ к которым предоставляется провайдерами таких сетей;

- приемлемая точность для большинства геодезических работ [3, 4].

Несмотря на вышеуказанные преимущества, режим RTK имеет ограничения в предельном расстоянии от базовой станции до 30 км [5]. Следует упомянуть о снижении точности определения координат при увеличении расстояния до базовой станции. В качестве примера рассмотрим приемник EFT M4 GNSS [6]. Его априорная средняя квадратическая погрешность (далее – СКП) в плане имеет следующие характеристики: ± 5 мм $+0,5$ мм/км. Из чего следует, что на условном нулевом километре от базовой станции точку можно определить с точностью в 5 мм, на 10-м километре – 10 мм и на 20-м – 15 мм соответственно [3]. Частично такое положение дел складывается из-за того, что ионосфера и тропосфера неоднородны по своей природе, а задержки прохождения сигнала через эти сферы вносят ключевой вклад в ухудшение точности получения координат спутниковым методом [7]. Технология виртуальных базовых станций (далее – VRS) призвана компенсировать вышеизложенные ошибки. Реализуется она по следующему принципу:

- при инициализации приемники пользователя отправляют свое примерное местоположение сети базовых станций;

- сеть, анализируя местонахождение пользователя, передает усредненную корректирующую информацию от ближайших базовых станций;

- сеть программно создает виртуальную базовую станцию (далее – bVRS) вблизи пользователя (на расстоянии 10–15 м) и генерирует набор виртуальных измерений [8, 9].

Не возникает сомнения, что технология VRS должна повысить точность определения координат спутниковым методом, так как в том числе возникает фактор избыточных измерений [10]. Но неясно,

на какую величину она улучшится. Возвращаясь к априорной СКП в плане спутникового оборудования ± 5 мм $+0,5$ мм/км, очевиден следующий тезис. Так как bVRS генерируется в непосредственной близости от пользователя, то априорная СКП будет ± 5 мм $+0,5$ мм, то есть 5 мм. Но при таком подходе не учитывается, с какой точностью в плановом положении была сгенерирована виртуальная станция. В свою очередь, оценить точность bVRS прямыми измерениями не представляется возможным.

В целом априорная СКП, указанная в технических характеристиках спутникового оборудования, говорит о том, что оборудование способно определить координаты с указанной точностью после холодного старта. Что, в свою очередь, не отображает точностные характеристики взаимного расположения определяемых пунктов в рамках одного цикла измерений. В качестве примера предположим, что после инициализации спутникового оборудования было определено плановое положение нескольких точек. Точность определения координат этих точек должна быть приближена к априорной СКП, но точность определения взаимного расположения точек относительно друг друга остается нераскрытой.

Для упрощения восприятия нижеизложенного текста введем ряд определений.

Холодная погрешность – это погрешность определения координат после инициализации оборудования, предположительно может быть систематической для ряда определений координат в рамках одного цикла измерений.

Относительная погрешность – это погрешность определения приращений координат между наблюдаемыми точками и/или базисов образуемых между точками, предположительно может быть независима от холодной погрешности.

Цель исследования – определить фактическую среднюю квадратическую погрешность координат виртуальной станции как следствие, уточнить СКП спутникового оборудования при использовании технологии VRS. Определить холодную и относительную погрешности для режима измерений в RTK и для режима измерений RTK с использованием технологии VRS.

Материалы и методы исследования

Исследование точности кинематики в реальном времени проводилось на двух объектах:

- ЖК «Квартал Герцена», расположенный по адресу: г. Москва, Бирюлево Восточное, 25–26 км МКАД;

– комплексная жилая застройка по адресу: Московская область, городской округ Балашиха, квартал «Б» (далее квартал – «Б»).

В качестве спутникового оборудования был использован приемник EPOCH 35, априорная СКП в плане в режиме RTK равна ± 10 мм $+1$ мм/км, базовая станция находилась на удалении примерно 4 км, за исключением серий измерений от 29.05.2025.

Исследования точности кинематики в реальном времени с использованием виртуальной базовой станции делились на полевые и камеральные работы.

Полевые работы заключались в нижеизложенном:

– цикл наблюдения представлял собой определение плановых координат в режиме RTK и/или в режиме VRS, в рамках одного цикла координаты определялись для трех жестко закрепленных на местности точек;

– измерение расстояний между точками при помощи тахеометра;

– в рамках одного рабочего дня проводилось не менее трех циклов наблюдений.

Камеральная обработка данных заключалась в определении фактической СКП для двух режимов наблюдений [11]. Определение отклонений базисов (расстояний) между координатами точек, полученных с помощью спутникового оборудования, по отношению к линейным размерам, полученным с помощью электронного тахеометра.

Результаты исследования и их обсуждение

Есть вероятность того, что относительная погрешность координатных определений может быть свободна или частично ослаблена от влияния тропосферы, так как наблюдения проводятся в относительно близком временном промежутке и тропосфера остается относительно неизменной. Наиболее репрезентативно, по мнению автора, будет проанализировать длину базисов между точками, полученными с помощью спутниковых определений.

Рассмотрим два варианта вычисления СКП базисов: по формуле Гаусса и по формуле Бесселя.

Таблица 1

Определение СКП базисов в режиме RTK по формулам Гаусса и Бесселя

01.09.24 ЖК «Квартал Герцена»					
Направление базисов	Отклонение базисов от эталона			СКП (RTK) по ф-ле Бесселя	СКП (RTK) по ф-ле Гаусса
	Цикл 1 (RTK)	Цикл 2 (RTK)	Цикл 3 (RTK)		
T1-T2	0,002	-0,026	0,010	0,019	0,016
T2-T3	-0,015	-0,001	0,010	0,013	0,010
T3-T1	-0,030	0,009	0,018	0,026	0,021
22.09.24 ЖК «Квартал Герцена»					
T1-T2	-0,012	-0,033	-0,006	0,014	0,021
T2-T3	-0,019	-0,024	0,025	0,027	0,023
T3-T1	-0,007	-0,003	-0,002	0,003	0,005
03.11.24 ЖК «Квартал Герцена»					
T1-T2	-0,003	-0,013	0,005	0,009	0,008
T2-T3	-0,014	-0,025	-0,006	0,010	0,017
T3-T1	-0,020	-0,031	0,000	0,016	0,021
26.07.25 ЖК «Квартал Герцена»					
T1-T2	0,011	-0,005	0,010	0,009	0,009
T2-T3	0,011	0,004	-0,003	0,007	0,007
T3-T1	0,007	-0,026	0,002	0,012	0,016
09.08.25 ЖК «Квартал Герцена»					
T1-T2	0,025	0,023	0,001	0,013	0,020
T2-T3	0,018	0,001	-0,003	0,011	0,011
T3-T1	0,014	-0,001	0,009	0,008	0,010

Источник: составлено автором на основе полученных данных в ходе исследования.

В первом варианте в качестве известной величины базисов будут использованы данные, полученные с помощью тахеометра. Для данного способа СКП определения базисов будет равна

$$m_k^2 = m_s^2 + (m_\beta^2 \times S^2) \div \rho^2,$$

где $m_k = 2$ мм, где

m_s – погрешность измерения расстояния = ± 2 мм;

m_β – погрешность измерения угла = $1''$;

S – измеренное расстояние в мм

($\approx 30 \text{ м} = 30000 \text{ мм}$);

ρ – (радиан) = $206265''$ (секунд);

так как определение базиса между двумя точками определяется путем определения координат двух точек, то максимальная погрешность измерения m_y будет равна:

$$m_y = \sqrt{2m_k}; \quad m_y = 3 \text{ мм.}$$

Следует отметить, что при благоприятных (фактических лабораторных) условиях точность определения базисов, полученных с помощью спутникового оборудования, не менее 10 мм. Точность определения базисов тахеометров – 3 мм. Исходя из вышеизложенного, было принято решение пренебречь погрешностью тахеометра и принять данные базисов, полученных им, за истинные.

Всего было выполнено 5 серий измерений в режиме RTK и 3 серии измерений в режиме VRS. Результаты определения СКП базисов в режиме RTK приведены в табл. 1, результаты определения СКП базисов в режиме VRS – в табл. 2.

Исходя из вышеизложенных таблиц, можно сделать выводы.

1. В режиме RTK максимальное СКП по формуле Бесселя – 27 мм и по формуле Гаусса – 23 мм, минимальное СКП – 3 мм и 5 мм соответственно. В свою очередь, отечественные коллеги проводили похожее исследование, результат определения базисов находился в диапазоне от 4 до 32 мм, что является сопоставимыми величинами с данными, указанными выше [12].

2. В режиме VRS максимальное СКП по формуле Бесселя – 11 мм и по формуле Гаусса – 9 мм, минимальное СКП 2 и 4 мм соответственно.

Максимальное СКП в обоих режимах измерений было получено в рамках одной серии наблюдений от 27.05.25.

Также был проведен анализ СКП определения плановых координат в двух режимах измерений. С результатами можно ознакомиться в табл. 3 и 4.

В режиме RTK СКП определения плановых координат находится в диапазоне от 1 до 17 мм, при наличии скачков – до 23 мм.

Следует отметить, что отечественные авторы в своей работе «Применение ГНСС в прикладной геоинформатике» проводили исследования в области определения сходимости плановых координат, полученных с помощью спутникового оборудования. При полевой части исследования использовалась базовая станция, находящаяся на расстоянии приблизительно 2 км, и передвижной приемник, закрепленный на автомобиле, движущемся со скоростью 3–5 км/ч. Результаты отечественных коллег свидетельствуют о сходимости плановых координат с точностью до 10 мм с разовыми скачками до 35 мм [13].

Таблица 2

Определение СКП базисов в режиме VRS по формулам Гаусса и Бесселя

22.09.24 ЖК «Квартал Герцена»					
Направление базисов	Отклонение базисов от эталона			СКП (VRS) по ф-ле Бесселя	СКП (VRS) по ф-ле Гаусса
	Цикл 1 (VRS)	Цикл 2 (VRS)	Цикл 3 (VRS)		
T1-T2	0,000	-0,003	0,006	0,005	0,004
T2-T3	0,010	0,002	0,012	0,005	0,009
T3-T1	0,010	0,005	-0,003	0,007	0,007
26.07.25 ЖК «Квартал Герцена»					
T1-T2	0,002	-0,009	0,000	0,006	0,005
T2-T3	0,007	0,003	0,006	0,002	0,006
T3-T1	0,004	-0,008	-0,010	0,008	0,008
09.08.25 ЖК «Квартал Герцена»					
T1-T2	0,001	-0,005	0,007	0,006	0,005
T2-T3	0,001	0,007	-0,014	0,011	0,009
T3-T1	0,011	0,005	-0,007	0,009	0,008

Источник: составлено автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

СКП определения плановых координат в режиме RTK по формуле Бесселя

01.09.24 ЖК «Квартал Герцена»			22.09.24 ЖК «Квартал Герцена»	03.11.24 ЖК «Квартал Герцена»
№ точки	Ось	СКП	СКП	СКП
1	X	0,016	0,001	0,004
	Y	0,014	0,015	0,017
2	X	0,006	0,023	0,005
	Y	0,013	0,013	0,011
3	X	0,007	0,011	0,009
	Y	0,018	0,006	0,019
26.07.25 ЖК «Квартал Герцена»			09.08.25 ЖК «Квартал Герцена»	
№ точки	СКП	СКП	СКП	
1	0,003	0,006	0,006	
	0,006	0,006	0,006	
2	0,009	0,006	0,006	
	0,013	0,003	0,003	
3	0,003	0,017	0,017	
	0,004	0,006	0,006	

Источник: составлено автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 4

СКП определения плановых координат в режиме VRS по формуле Бесселя

22.09.24 ЖК «Квартал Герцена»			26.07.25 ЖК «Квартал Герцена»	09.08.25 ЖК «Квартал Герцена»
№ точки	Ось	СКП	СКП	СКП
1	X	0,013	0,006	0,003
	Y	0,006	0,003	0,006
2	X	0,006	0,009	0,003
	Y	0,008	0,001	0,003
3	X	0,009	0,011	0,007
	Y	0,005	0,006	0,005

Источник: составлено автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Также в работах «Исследование точности определения координат точек спутниковым приемником в режиме RTK», «Сравнительный анализ точности спутниковых определений в различных режимах измерений» авторы пришли к схожим СКП [14, 15].

Заключение

В таблицах выше приведены СКП базисов и координатных определений отдельно по каждому циклу наблюдений, для более репрезентативного отображения данных

и исключения влияния случайных ошибок ниже рассмотрим СКП которые рассчитаны суммарно с учетом всех серий измерений.

Базовая станция находилась на удалении 4 км от ровера. Априорная СКП в таком случае будет равна 14 мм. Фактическая СКП в режиме RTK составила 11 мм, фактическая СКП с использованием технологии VRS составила 7 мм, то есть результат лучше на 36%. Если из фактической СКП вычесть увеличение погрешности за увеличение расстояния до базовой станции

(1 мм/км = 4 мм), получим такое же СКП, как и с использованием технологии VRS. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что фактическая СКП координат виртуальной базовой станции равняется нулю. Априорная СКП спутникового оборудования в режиме VRS будет подчинена той же формуле, что и при работе в режиме классической RTK.

Общая СКП базисов в режиме RTK по всем циклам наблюдений составила 13 мм, в режиме VRS – 7 мм.

Анализ определения длин базисов не показал существенного отличия от погрешности определения плановых координат, исходя из чего можно сделать вывод о том, что холодная и относительная погрешности являются одинаковыми как для режима измерений RTK, так и для режима измерений RTK с использованием технологии VRS.

Список литературы

1. Пархоменко Н.А., Зайшлов К.А. Оценка точности съемки при использовании ГНСС оборудования в режиме RTK // Актуальные проблемы геодезии, землеустройства и кадастра. 2023. С. 51–59. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54915891> (дата обращения: 23.09.2025).
2. Фокин Г.А., Мещеряков Д.Е. Обзор возможностей программно-аппаратного комплекса Prince для высокоточного позиционирования методом RTK // Экономика и качество связи. 2025. Т. 3. № 37. С. 77–94. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-vozmozhnostey-programmno-apparatnogo-kompleksa-prince-dlya-vysokotochnogo-pozitsionirovaniya-metodom-rtk> (дата обращения: 23.09.2025).
3. Липанов И.Д., Хомоненко А.Д., Молодкин И.А. Сравнительный анализ методов точного позиционирования беспилотных летательных аппаратов // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 1 (41). С. 27–36. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-metodov-tochnogo-pozitsionirovaniya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov> (дата обращения: 23.09.2025).
4. Елагин А.В., Зайцев М.В., Прохоров Д.А., Шендрик Н.К. Оценка точности определения координат спутниковыми приемниками EFT M3 GNSS и EFT M4 GNSS в режиме RTK // Вестник СГУГИТ. 2020. Т. 25. С. 26–33. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43951993> (дата обращения: 23.09.2025). DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-26-33.
5. Эминов Р.А., Асадов Х.Г. Метод максимально информативной зоны для построения виртуальной базовой станции в кинематических схемах геодезических GPS-сетей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2 (84) С. 71–76. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-maksimalno-informativnoy-zony-dlya-postroeniya-virtualnoy-bazovoy-stantsii-v-kinematicheskikh-shemah-geodezicheskikh-gps-setey> (дата обращения: 23.09.2025).
6. Медяников Д.О., Печников С.Н., Прокофьев А.В., Сергеев Д.В. Исследование точности определения координат пунктов в режиме реального времени (RTK) от одной базовой станции // Труды военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2025. № 695. С. 146–154. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82333158> (дата обращения: 23.09.2025).
7. Бубнова С.А., Кожин П.Ф. Сравнительная оценка точности геодезических данных, полученных современными способами спутниковых координатных определений // Образцовый маршрут: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Российский университет транспорта (МИИТ). М., 2024. С. 53–62. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=75991776> (дата обращения: 23.09.2025).
8. Курасов С.В., Хахулина Н.Б. Зарубежный опыт использования спутниковых систем в кадастре // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 8. С. 54–59. URL: <https://disk.yandex.ru/i/IW0tuRijOXJ-xw> (дата обращения: 23.09.2025).
9. Акифьев И.В., Еремкин А.И., Пономарева И.К. Инновационный метод выполнения геодезических работ в строительстве на принципах навигационной системы ГЛОНАСС // Региональная архитектура и строительство. 2022. № 4 (53). С. 111–119. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49914671> (дата обращения: 23.09.2025). DOI: 10.54734/20722958_2022_4_111.
10. Лесюта О.С., Миронов В.А. Применение кинематики реального времени // Молодежный вестник ИРГТУ. 2016. № 2. С. 19–30. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26159462> (дата обращения: 23.09.2025).
11. Шабарова В.А., Вьюшкова Ю.Б. Определение точностных характеристик навигационных приемников в режиме RTK // E-Scio. 2020. № 7 (46). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-tochnostnyh-harakteristik-navigatsionnyh-priyomnikov-v-rezhime-rtk> (дата обращения: 23.09.2025).
12. Морозов Д.А., Кузнецов Д.А., Лебе Д.Е., Перминов А.Ю. Проектирование автоматизированной системы пространственных смещений фазового центра спутниковой геодезической аппаратуры // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 5. С. 4–10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovanie-avtomatizirovannoy-sistemy-prostranstvennyh-smeshcheniy-fazovogo-tsentra-sputnikovoy-geodezicheskoy-apparaty/viewer> (дата обращения: 23.09.2025).
13. Купрянов А.О., Цветков В.Я. Применение ГНСС в прикладной геоинформатике // Образовательные ресурсы и технологии. 2016. № 1 (13). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-gnss-v-prikladnoy-geoinformatike> (дата обращения: 23.09.2025).
14. Акифьев И.В., Макарова К.М. Исследование точности определения координат точек спутниковым приемником в режиме RTK // Образование и наука в современном мире. 2023. № 5 (48). С. 72–78. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54647778> (дата обращения: 23.09.2025).
15. Ванеева М.В., Сорока Ю.С., Жаренков М.Н. Сравнительный анализ точности спутниковых определений в различных режимах измерений // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). 2022. № 1 (14). С. 81–87. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49174019> (дата обращения: 23.09.2025).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.