

УДК 621.396.96

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-22-32>

Методика контроля многолучевости на основе анализа отношения плотности несущей к шуму

Н. С. Косарев¹✉

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

Аннотация. В статье представлена методика контроля многолучевости ГНСС-сигналов, основанная на анализе характеристики сигнала. Предложенная методика включает два этапа: анализ RINEX-файлов с оценкой среднеквадратической ошибки (СКО) в программных продуктах RINGO и TEQC и фильтрацию данных на основе пороговых значений, аппроксимированных полиномом четвертой степени. Критерием качества оценки СКО кодовой многолучевости является критерий REC, рекомендуемый руководящими документами Международной ГНСС-службы (IGS), относительно качества данных, применимыми как к текущим активным станциям, так и к предлагаемым станциям, и который равен 0,3 м. Апробация разработанной методики проведена на данных с пунктов NSK1 и NOVМ за февраль–март 2025 г. Пункт NSK1 входит в фундаментальную астрономо-геодезическую сеть Российской Федерации, а пункт NOVМ является одним из пунктов Международной ГНСС-службы. Условия наблюдений на этих пунктах различные, пункт NSK1 имеет открытый горизонт, в то время как пункт NOVМ расположен в районе с плотной городской застройкой. По результатам исследований установлено, что в 90 % случаев применение методики улучшает коэффициент Ratio, что свидетельствует о повышении точности разрешения фазовых неоднозначностей. Стоит отметить, что методика может быть улучшена за счёт сглаживания данных, которые подвержены влиянию многолучевости, в качестве такого фильтра может выступать адаптивная рекуррентная процедура калмановского типа.

Ключевые слова: многолучевость, отношение плотности несущей к шуму, ГНСС, ФАГС, IGS, RINEX

Для цитирования:

Косарев Н. С. Методика контроля многолучевости на основе анализа отношения плотности несущей к шуму. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 22–32. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-22-32>

Multipath Monitoring Technique Based on Carrier-to-Noise Density Ratio Analysis

N. S. Kosarev¹✉

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

Abstract. The article presents a methodology for monitoring GNSS signal multipath based on the carrier-to-noise density ratio analysis. The proposed approach comprises two stages: analysis of RINEX files with root mean square error (RMSE) estimation using RINGO and TEQC software, followed by data filtering based on threshold values approximated by a fourth-degree polynomial. The quality criterion for code multipath RMSE assessment is the REC metric, recommended by International GNSS Service (IGS) guidelines on data quality, applicable to both current active stations and proposed stations, with a thresh-

old of 0.3 m. The methodology was validated using data from NSK1 and NOVМ stations for February-March 2025. NSK1 station is part of the Fundamental Astro-Geodetic Network (FAGN) of the Russian Federation, while NOVМ is an IGS station. Observation conditions differ: NSK1 features an open horizon, whereas NOVМ is located in an area with dense urban development. Research results show that the methodology improves the Ratio coefficient in 90% of cases, indicating enhanced phase ambiguity resolution accuracy. Notably, the approach can be further refined through smoothing of multipath-affected data using an adaptive Kalman-type recursive filtering procedure.

Keywords: multipath, carrier-to-noise density ratio, GNSS, FAGN, IGS, RINEX

For citation:

Kosarev N. S. (2026). Multipath Monitoring Technique Based on Carrier-to-Noise Density Ratio Analysis. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGIT]* Vol. 31, No. 2. pp. 22–32. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-22-32>

Введение

Эффект многолучевого распространения ГНСС-сигналов возникает во время приема антенной одновременно прямого сигнала навигационного спутника и этого же сигнала, отраженного от окружающих объектов и поверхностей [1, 2]. Многолучевость зависит от вида измерений (кодовые и фазовые), их частоты и взаимного положения спутник-приемник. При неизменном окружении антенны, то есть при статических измерениях, величина ошибки позиционирования, вызванная многолучевостью, медленно изменяется в течение сеанса наблюдений.

К сожалению, полностью исключить влияние многолучевости в ГНСС-сигналах не представляется возможным, хотя есть ряд подходов для ее ослабления. Для ослабления влияния многолучевости рекомендуют выбирать для измерений места с открытым радиогоризонтом, а при невозможности переноса точки – устанавливать ГНСС-антенны специальных конструкций (дрессельные кольца, экраны и т. д.), использовать уменьшающие или исключаяющие этот эффект комбинации измерений (кодовых и фазовых псевдодальностей [1], по фазовым разностям через звездные сутки [3]), использовать алгоритмы фильтрации измеренных псевдодальностей [4–6]. Другой подход к оценке многолучевости – создание специальных стендов, имитирующих переотраженные ГНСС-сигналы [7, 8].

Существенно уменьшить вклад этой ошибки при кодовых измерениях можно усреднением результатов за некоторый период

времени, а при измерениях по фазе несущей – увеличением продолжительности сеансов синхронных измерений базовой линии [3]. Для базовой станции уменьшение многолучевости методом усреднения не подходит, поскольку ошибки многолучевости меняются со временем и местом приема сигналов от спутников.

В рамках данной статьи представлена разработанная методика выявления многолучевости в измерениях кодовых и фазовых псевдодальностей на основании анализа отношения плотности несущей частоты к шуму, зафиксированной приемником в файле наблюдений. Теоретически предложенный подход базируется на ряде зарубежных публикаций [9, 10].

Стоит отметить, что предлагаемую методику стоит включить в виде алгоритма в отечественный программный продукт для автоматизированного геодезического мониторинга для контроля многолучевости данных ГНСС.

Теоретические основы многолучевого распространения ГНСС-сигнала

Общие сведения о многолучевости. Многолучевость, как отмечено выше, возникает во время приема ГНСС-антенной одновременно прямого сигнала спутника и сигнала, отраженного от окружающих объектов и поверхностей. Многолучевые сигналы всегда проходят более длинный путь, чем прямые, при этом амплитуда отраженного сигнала уменьшается из-за затухания. Затухание сигнала зависит от отражающего материала, угла падения и поляризации сигнала [1].

Величина многолучевости фазовых ГНСС-измерений может быть представлена с использованием плоской вертикальной отражающей поверхности (рис. 1).

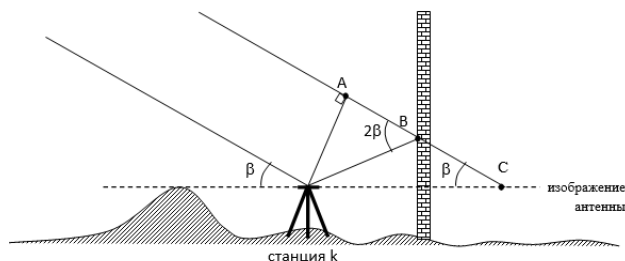


Рис. 1. Геометрия плоской вертикальной отражающей поверхности [3, 11]

Предположим, что прямой и отраженный сигналы представлены как

$$S_D = A \cos(\varphi); \quad (1)$$

$$S \approx S_D + S_R = A \cdot \sqrt{1 + 2\alpha \cdot \cos \theta + \alpha^2} \cdot [\cos(\varphi + \psi)]. \quad (4)$$

В формуле (4) ψ – результирующая фаза многолучевого сигнала, которая определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\alpha \cdot \sin \theta}{1 + \alpha \cdot \cos \theta}. \quad (5)$$

Принимая в формуле (5) $\alpha = 1$ и преобразуя, получим $\psi = 0,5 \cdot \theta$.

В табл. 1 приведена зависимость результирующей фазы многолучевого сигнала от результирующей фазы отраженного сигнала (по формуле (5)) [2].

Таблица 1. Зависимость результирующей фазы многолучевого сигнала от результирующей фазы отраженного сигнала

| $\psi, ^\circ$ | α | $\theta, ^\circ$ |
|----------------|------------|------------------|
| 0 | 2 | 0 |
| 90 | $\sqrt{2}$ | 45 |
| 180 | 0 | 90 |

Из табл. 1 видно, что максимальное значение результирующей фазы многолучевого сигнала будет при $\theta = 90^\circ$, которая составляет $\frac{1}{4}$ длины волны, что дает в линейной мере для частоты $L1$ системы GPS примерно 5-6 см. Для линейных комбинаций различных частот

$$S_R = \alpha A \cos(\varphi + \theta), \quad (2)$$

где S_R – величина отраженного сигнала; S_D – величина прямого сигнала; A – амплитуда сигнала (напряжение сигнала); α – коэффициент затухания; θ – фаза отраженного сигнала.

Фаза отраженного сигнала может быть записана как

$$\theta = 2\pi f \Delta\tau + \varphi = \frac{4\pi d}{\lambda} \cdot \cos \beta + \varphi, \quad (3)$$

где f – частота несущего сигнала; $\Delta\tau$ – временная задержка; φ – дробная часть фазы сигнала, d – расстояние от отражающей поверхности до ГНСС-антенны, λ – длина волны несущего сигнала; β – угол возвышения спутника ГНСС.

Сумма прямой и отраженных волн в антенне приемника даст результирующее поле S , которое можно представить в виде векторной суммы

влияние многолучевости будет зависеть от вида комбинации.

Многолучевость кодовой псевдодальности ведет себя во многом подобно фазе несущей, за исключением того, что изменения на несколько порядков больше. Кодовая многолучевость, в отличие от фазовой, зависит от скорости кодов и внутреннего интервала дискретизации приемника. Обычно величина кодовой многолучевости составляет около 10 м, но в отдельных случаях может достигать 150 м для стандартного (гражданского) кода и 15 м для точного (военного) кода.

Связь многолучевости с величиной отношения плотности несущей к шуму

Для отслеживания мощности принимаемого сигнала различных спутников в ГНСС-приёмниках используются две величины: отношение плотности несущей частоты к шуму (C/N_0) и отношения сигнал/шум (SNR). Эти величины взаимозаменяемы, но при этом они имеют фундаментальные различия, которые зачастую упускаются из виду.

Отношение сигнал/шум (SNR) определяется следующим образом [12]

$$SNR = 10 \cdot \log \left(\frac{CNR}{B_p} \right), \quad (6)$$

где CNR – отношение несущей к шуму; B_p – ширина полосы шума в Гц.

С другой стороны отношение сигнал/шум (SNR) может быть записано в следующей форме:

$$SNR = S - N, \quad (7)$$

где S – мощность сигнала, обычно мощность несущей, выраженная в единицах децибел/милливатт (дБм) или децибел/ватт (дБВт); N – мощность шума, обычно незначительная, выраженная в единицах децибел/милливатт (дБм) или децибел/ватт (дБВт).

Отношение сигнал/шум связано с результирующим полем (см. формулу (4)) следующим образом:

$$SNR \approx S = S_D + S_R = A \cdot \sqrt{1 + 2\alpha \cdot \cos \theta + \alpha^2} \cdot [\cos(\varphi + \psi)]. \quad (8)$$

В свою очередь отношение плотности несущей к шуму (C/N_0) – это отношение мощности несущей и мощности шума на единицу ширины полосы пропускания, которое связано с отношением сигнал/шум (SNR) следующим образом [12]:

$$C/N_0 = SNR + BW, \quad (9)$$

где BW – это полоса пропускания, которая обычно представляет собой эквивалентную шуму полосу пропускания последнего каскада фильтра во входном каскаде приемника. Обычно значения величины C/N_0 в приемнике, который отслеживает гражданский код на частоте $L1$, находятся в диапазоне от 37 до 45 дБ/Гц.

В отечественной геодезической литературе термин «отношение плотности несущей к шуму» зачастую заменяют на «отношение сигнал/шум», в силу недостаточной, как отмечалось в [13], подготовленности технических специалистов и переводчиков. Критически важным корректное использование термина становится при анализе непосредствен-

ных измерений и их характеристик из RINEX-файлов, поскольку неверное понимание сущности приведенных величин влечет за собой неверную их интерпретацию или преобразование в алгоритмах.

Материалы и методы

Методика контроля многолучевости на основе анализа отношения плотности несущей к шуму. Выявление наличия многолучевости в спутниковых измерениях на определяемой станции выполняется с использованием файла наблюдений (moveDOYi.YY0), программ анализа наблюдений (TEQC или RINGO) в несколько этапов (рис. 2).

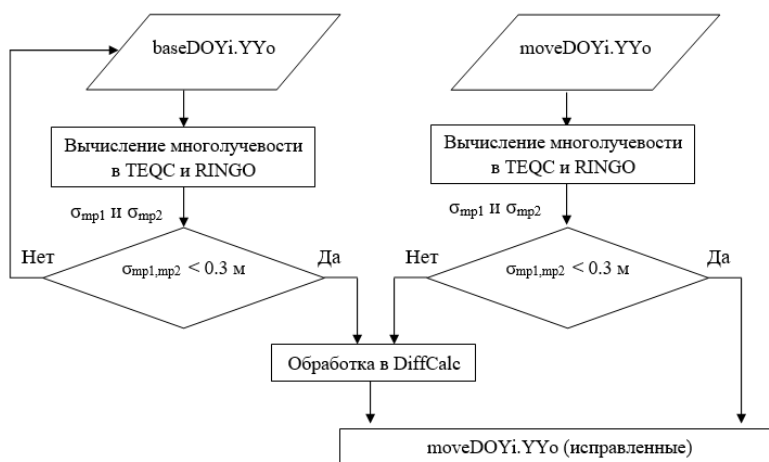


Рис. 2. Схема методики контроля многолучевости на основе анализа отношения плотности несущей

Первый этап – оценка значения многолучевости для каждого частотного диапазона ГНСС. С помощью программ TEQC или RINGO выполняется анализ RINEX-файлов определяемой (moveDOYi.YY0) и базовой (baseDOYi.YY0) станций, по результатам которого вычисляется линейная комбинация (ЛК) кодовых и фазовых псевдодальностей, показывающая величину многолучевости [14, 15]

$$MP_{ij} = P_i - L_i - \frac{2 \cdot f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \cdot (L_i - L_j), \quad (10)$$

где P_i – кодовая псевдодальность на несущей частоте f_i ; L_i – фазовая псевдодальность на несущей частоте f_i , f_i и f_j – несущая частота i и j сигналов ГНСС.

В ЛК (10) присутствует не только многолучевость и шум кодовых измерений, но и фазовая многолучевость и шум фазы несущей, фазовая неоднозначность N и аппаратные задержки. Фазовая многолучевость и шум фазы несущей намного меньше, чем кодовая многолучевость и шум псевдодальности, поэтому первую можно игнорировать.

Для устранения фазовой неоднозначности N и аппаратных задержек из уравнения (10) выполняется усреднение данных во времени на дуге орбиты спутника [16]

$$mp_{ij} = MP_{ij} - \frac{\sum_{t=1}^m MP_{ij}}{m}, \quad (11)$$

где m – временной отрезок, на котором осуществляется усреднение данных.

В программных продуктах TEQC и RINGO усреднение данных во времени, по своей сути, является скользящим средним, и окно выборки N составляет 50 значений.

По результатам предварительного анализа RINEX-файла в отчете по оценке качества ГНСС-измерений приводится средняя квадратическая ошибка (СКО) величины mp_{ij} для каждого спутника, а также ее усредненное значение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n \left[\left(mp_{ij} \right)_k - \left(mp_{ij} \right)_{\text{ср}} \right]^2}{n-1}}, \quad (12)$$

где $\left(mp_{ij} \right)_{\text{ср}}$ – среднее значение величины mp_{ij} .

Усредненное значение СКО кодовой многолучевости для каждого частотного диапазона ГНСС сравнивается с критерием качества REC, который равен 0,3 м [17]. Данный критерий введен руководящими документами Международной ГНСС-службы (МГС) для оценивания качества наблюдений на постоянно действующих базовых станциях, включенных в сеть МГС, и к наблюдениям станций – кандидатов на включение в эту сеть.

Если усредненное значение СКО кодовой многолучевости в анализируемом файле не превышает REC, то файл передается для дальнейшей совместной обработки в штатном ПО. Данный результат является обязательным для наблюдений базовой станции.

При превышении заданного порога вычисленной величины усредненного значения СКО кодовой многолучевости выполняется анализ отношения плотности несущей к шуму и фильтрация наблюдений.

Второй этап – анализ отношения плотности несущей к шуму. В программном продукте DiffCalc, разработанном коллективом авторов [18], осуществляется анализ плотности несущей к шуму, входными параметрами для которого являются набор RINEX файлов наблюдений и навигационных параметров определяемой и базовой (*.**o, *.**n и *.**g) станций (рис. 3).

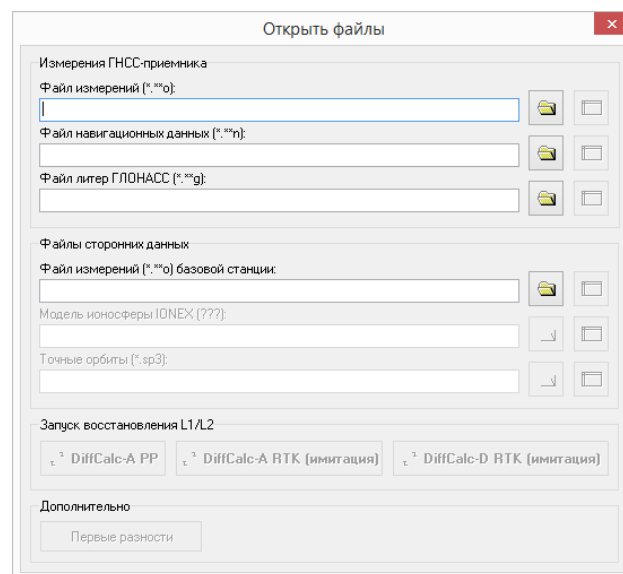


Рис. 3. Главное меню программы DiffCalc

Последовательно осуществляются следующие шаги:

– выполняется чтение RINEX-файла базовой станции (БС) и определяемой станции (ОС), после которого составляется массив данных значений отношения плотности несущей к шуму C/N_0 для всех наблюдаемых спутников ГНСС;

– вычисляется угол возвышения β всех наблюдаемых спутников ГНСС на БС и ОС в каждый момент наблюдений;

$$f(\beta) = (C/N_0)_s = a + b \cdot \beta + c \cdot \beta^2 + d \cdot \beta^3 + e \cdot \beta^4, \quad (14)$$

где β – угол возвышения наблюдаемых спутников ГНСС;

– выполняется сравнение значения C/N_0 наблюдаемого спутника ГНСС на каждый момент времени ОС с вычисленным значением C/N_0 из полинома четвертой степени на БС, если разность превышает 10 дБ/Гц, то измерения, которые не проходят пороговое значение, не участвуют на этапе совместной обработки [10, 19]

$$|C/N_0(\beta) - (C/N_0)_s| < 10, \quad (15)$$

где $C/N_0(\beta)$ – значение отношения плотности несущей к шуму на каждый момент времени на ОС, полученной из массива данных с известным углом возвышения β наблюдаемого спутника ГНСС.

Апробации методики контроля многолучевости на основе анализа отношения плотности несущей к шуму. Апробация методики адаптивного контроля многолучевости на основе анализа отношения плотности несущей к шуму была выполнена на суточных ГНСС-измерениях, собранных на пункте ФАГС – NSK1, и на пункте Международной ГНСС службы – NOVМ, продолжительностью два месяца с февраля по март 2025 г.

Условия наблюдений на пунктах различаются: на пункте ФАГС открытый радиогоризонт, а на пункте МГС – полузакрытый радиогоризонт, поэтому в предлагаемой методике в качестве базовой станции выступал пункт NSK1, а мобильной – NOVМ. В табл. 2 приведены общие сведения о пунктах, участвующих в апробации методики.

– массив данных значений C/N_0 базовой станции ранжируется по углу возвышения спутников β ;

– определяется функциональная зависимость отношения плотности несущей к шуму (C/N_0) к углу возвышения наблюдаемых спутников ГНСС

$$f(\beta) = C/N_0; \quad (13)$$

– функциональная зависимость $f(\beta)$ аппроксимируется полиномом четвертой степени

Таблица 2. Общие сведения о пунктах

| | NSK1 | NOVM |
|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| ГНСС-антенна | LEIAR20 LEIM | JPSREGANT_SD_E1 |
| ГНСС-приёмник | Leica GR50 | JPS LEGACY |
| Стандарт частоты | Рубидиевый | Водородный |
| Отслеживаемые сигналы | GPS, ГЛОНАСС, GALILEO и BEIDOU | GPS и ГЛОНАСС |
| Условия наблюдений | Открытый радиогоризонт | Наличие городской застройки |

Результаты обработки ГНСС-данных

В соответствии с разработанной методикой на первом этапе был выполнен анализ шестидесяти суточных RINEX файлов с помощью программных продуктов TEQC и RINGO. По результатам анализа установлено, что на пункте Международной ГНСС-службы NOVМ усредненное значение СКО кодовой многолучевости по всем наблюдаемым спутниковым системам превышает заданный порог в 0,3 м, в то же время на пункте ФАГС NSK1 этого не наблюдается. Полученный результат полностью коррелирует с условиями наблюдений на этих пунктах.

На втором этапе с помощью программы DiffCalc были определены функциональные зависимости отношения плотности несущей к шуму C/N_0 к углу возвышения наблюдаемых спутников ГНСС для частотных диапазонов L1 и L2. Всего было получено 270 000 значений C/N_0 , которые затем были ранжированы и сгруппированы по высоте спутника от 10 до 90 градусов с шагом один градус. Далее

сгруппированные данные были осреднены, после чего построена функциональная зависимость отношения плотности несущей к шуму (C/N_0) к углу возвышения наблюдаемых спутников ГНСС (рисунок 4).

На рис. 4 показаны: красным цветом – осредненные значения отношения плотности

несущей к шуму на частоте L1, синим – на частоте L2.

На этапе совместной обработки осуществлялось вычисление базовой линии NSK1-NOVM в специализированном программном обеспечении RTKPOST при следующих настройках (рис. 5).

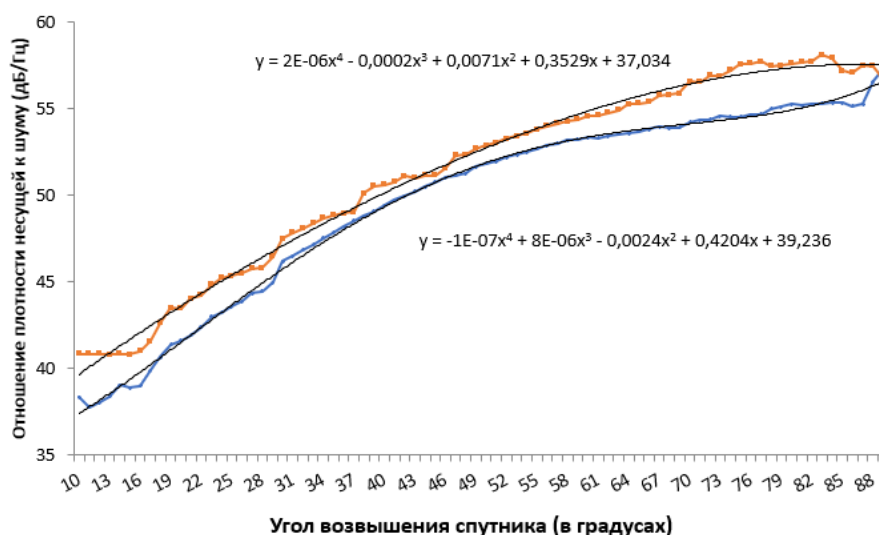


Рис. 4. Функциональная зависимость отношения плотности несущей к шуму (C/N_0) к углу возвышения наблюдаемых спутников ГНСС (на базовой станции)

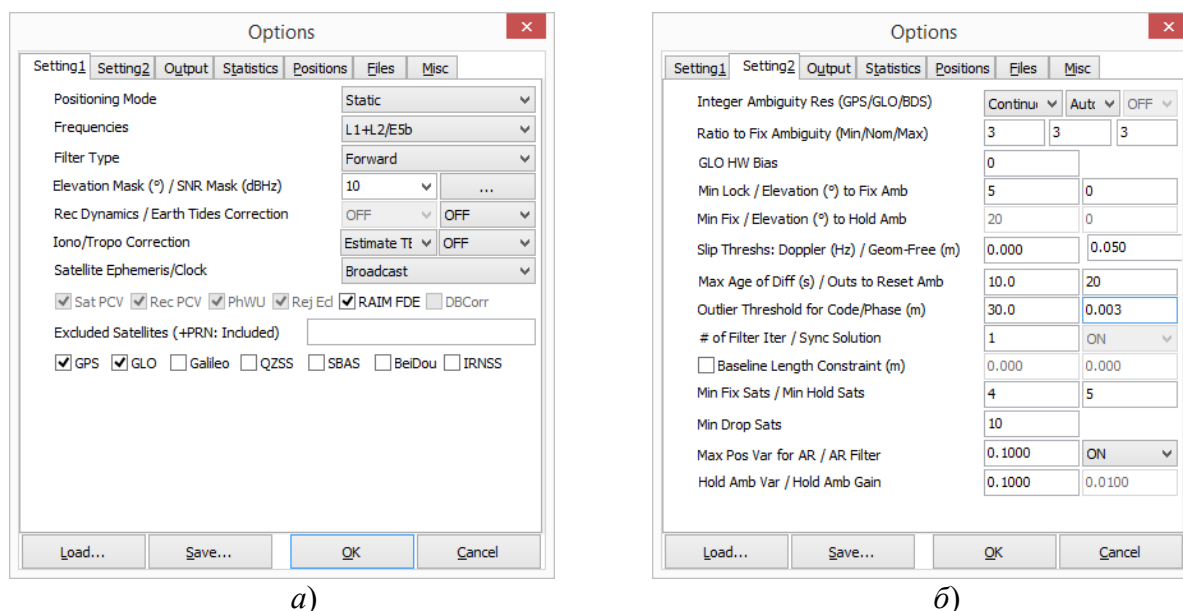


Рис. 5. Настройки в RTKPOST для обработки базовой линии

Обработка осуществлялась дважды: с учетом сравнения значений C/N_0 каждого наблюдаемого спутника ГНСС на ОС с вы-

численным значением C/N_0 из полинома четвертой степени, а также без исправления данных (рис. 6).

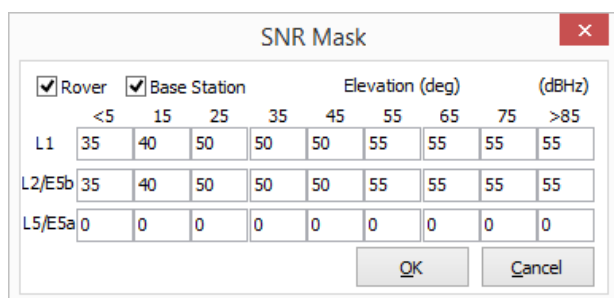


Рис. 6. Опорные значения отношения плотности несущей к шуму

Всего было обработано 120 базовых линий, каждая из которых имела продолжительность 24 часа. В качестве критерия оценки качества обработки БЛ выступала величина Ratio, которая показывает качество разрешения фазовых неоднозначностей

$$Ratio = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2}, \quad (16)$$

где σ_2^2 – дисперсия второго наиболее вероятного варианта разрешения неоднозначностей, σ_1^2 – дисперсия первого вероятного варианта разрешения неоднозначностей. Для получения фиксированного решения во многих программных продуктах по обработке базовых линий используется величина критерия Ratio, равная трем.

В табл. 3 приведены результаты вычислений с 35 по 48 день 2025 г.

Таблица 3. Результаты вычислений с 35 по 48 день 2025 г.

| День от начала года | БЛ | До | | | | После | | | |
|---------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|----------------|-------------|
| | | m _x | m _y | m _z | Ratio | m _x | m _y | m _z | Ratio |
| 35 | NSK1-NOVM | 0.0013 | 0.0014 | 0.0012 | 7.9 | 0.0015 | 0.0017 | 0.0016 | 247.9 |
| 36 | NSK1-NOVM | 0.0012 | 0.0014 | 0.0014 | 27.1 | 0.0014 | 0.0017 | 0.0017 | 34.5 |
| 37 | NSK1-NOVM | 0.0012 | 0.0014 | 0.0013 | 19.9 | 0.0014 | 0.0016 | 0.0015 | 23.7 |
| 38 | NSK1-NOVM | 0.0012 | 0.0015 | 0.0014 | 390.2 | 0.0015 | 0.0018 | 0.0017 | 401.2 |
| 39 | NSK1-NOVM | 0.0012 | 0.0014 | 0.0013 | 222.6 | 0.0014 | 0.0016 | 0.0015 | 8.8 |
| 40 | NSK1-NOVM | 0.0012 | 0.0014 | 0.0013 | 44.7 | 0.0014 | 0.0016 | 0.0015 | 63.4 |
| 41 | NSK1-NOVM | 0.0013 | 0.0014 | 0.0013 | 38.8 | 0.0015 | 0.0016 | 0.0016 | 52.9 |
| 42 | NSK1-NOVM | 0.0013 | 0.0014 | 0.0013 | 135.0 | 0.0015 | 0.0016 | 0.0015 | 197.0 |
| 43 | NSK1-NOVM | 0.0014 | 0.0015 | 0.0014 | 101.6 | 0.0015 | 0.0018 | 0.0017 | 13.2 |
| 44 | NSK1-NOVM | 0.0013 | 0.0014 | 0.0013 | 11.1 | 0.0014 | 0.0016 | 0.0015 | 184.8 |
| 45 | NSK1-NOVM | 0.0013 | 0.0015 | 0.0014 | 118.1 | 0.0016 | 0.0018 | 0.0018 | 384.2 |
| 46 | NSK1-NOVM | 0.0012 | 0.0015 | 0.0013 | 35.6 | 0.0014 | 0.0017 | 0.0016 | 43.9 |
| 47 | NSK1-NOVM | 0.0012 | 0.0015 | 0.0014 | 35.9 | 0.0015 | 0.0017 | 0.0016 | 133.5 |
| 48 | NSK1-NOVM | 0.0012 | 0.0014 | 0.0013 | 29.3 | 0.0014 | 0.0015 | 0.0016 | 99.0 |

По результатам проведенных исследований установлено, что в 90 % случаев коэффициент Ratio, определяющих качество разрешения фазовых неоднозначностей, улучшается, что говорит о том, что предложенная методика позволяет эффективно исключать из измерений многолучевость и повышать качество полученных решений. Стоит отметить, что методика может быть улучшена за счёт

сглаживания данных, которые подвержены влиянию многолучевости, в качестве такого фильтра может выступать адаптивная рекуррентная процедура калмановского типа [20].

Заключение

В статье представлена методика контроля многолучевости ГНСС-сигналов на основе ана-

лиза отношения плотности несущей к шуму, которая позволяет повысить точность геодезических измерений и минимизировать влияние помех, вызванных многолучевым распространением сигналов. Автором предложен последовательный алгоритм обработки данных, включающий анализ RINEX-файлов, оценку среднеквадратической ошибки и фильтрацию измерений на основе пороговых значений отношения плотности несущей к шуму.

Апробация методики на реальных данных показала её эффективность – в 90 % случаев наблюдалось улучшение коэффициента Ratio, что свидетельствует о повышении качества разрешения фазовых неоднозначностей. Это подтверждает, что предложенный подход позволяет исключать из измерений данные, искаженные многолучевостью, и повышать надежность результатов. Стоит отметить, что апробация методики проводилась для базовых

линий длиной до 10 км, что достаточно для использования ее в программных продуктах для автоматизированного геодезического мониторинга.

В настоящее время методика контроля многолучевости ГНСС-сигналов на основе анализа отношения плотности несущей к шуму внедрена в виде алгоритма в отечественный программный продукт для автоматизированного геодезического мониторинга ГЕОМОН [21, 22].

Благодарность

Автор выражает благодарность доценту, кандидату технических наук, доценту кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела СГУГиТ Елене Константиновне Лагутиной за полезные замечания и советы, улучшившие содержание данной статьи.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Teunissen P. J. G., Montenbruck O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. – Springer International Publishing AG, 2017. 1272 p.
2. Misra P. N., Enge P. Global Positioning System. Signals, Measurements and Performance. USA : Ganga-Jamuna Press, 2001. 390 p.
3. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография в 2-х томах. М. : Картгеоцентр. Том 2. 2006. 360 с.
4. Татарников Д. В., Астахов А. В., Степаненко А. П., Шаматульский П. П., Емельянов С. Н. Антенные технологии высокоточного спутникового позиционирования. Антенны. 2016. № 10 (230). С. 77–89.
5. Вейцель А.В., Жодзишский М.И., Милютин Д.С. Ошибки многолучевости для различных спутниковых сигналов. Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. № 8. С. 34–41.
6. Lau L. Investigations into the residual multipath errors of choke-ring geodetic antennas on GNSS carrier-phase measurements. GPS Solutions. 2025. Vol. 29. Paper 42. DOI: 10.1007/s10291-024-01801-9.
7. Куприянов А. О., Нейман Ю. М., Морозов Д. А., Перминов А. Ю. Разработка алгоритма анализа переотражений навигационного сигнала для изучения влияния многолучевости на ГНСС-измерения. Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2017. № 6. С. 41–44.
8. Перминов А. Ю., Морозов Д. А., Куприянов А. О. Экспериментальная апробация методики определения влияния многолучевости на кодовые и фазовые измерения по сигналам ГНСС. Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2022. Т. 66. № 5. С. 6–13. DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-5-6-13.
9. Zhang Z., Li B., Gao Y., Shen Yu. Real-time carrier phase multipath detection based on dual-frequency C/N0 data. GPS Solutions. 2019. Vol. 23. Paper 7. DOI: 10.1007/s10291-018-0799-6
10. Kubo N., Kobayashi K., Furukawa R. GNSS Multipath Detection Using Continuous Time-Series C/N0. Sensors. 2020. Vol. 20. Paper 4059. DOI: 10.3390/s20144059.
11. Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D. GPS Satellite Surveying. – New York : A Willey-Interscience Publication. 2015. 806 p.
12. Joseph, A. What is the difference between SNR and CN0. Inside GNSS. 2010. Vol. 11. P. 20–25.

13. Антонович К. М., Косарев Н. С. Преподавание спутниковой геодезии в условиях противоречивой терминологии и нормативной базы. Актуальные вопросы образования. 2014. № 1. С. 60–63. EDN: TVOYRJ.
14. Kawamoto S., Takamatsu N., Abe S. RINGO: A RINEX pre-processing software for multi-GNSS data. *Earth, Planets and Space*. 2023. Vol. 75(54). P. 1–15.
15. Estey L., Meertens C. TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data. *GPS Solutions*. 1999. Vol. 3. P. 42–49. DOI: 10.1007/PL00012778.
16. Abou Galala M., Kaloop M. R., Rabah M. M., Zeidan Z. M. Improving precise point positioning convergence time through TEQC multipath linear combination. *J. Surv. Eng.* 2018. Vol. 144. 04018002. DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000250.
17. García-Armenteros J.A. Quality assessment of the Topo-Iberia CGPS stations and data quality's effects on postfit ionosphere-free phase residuals. *Geodesy and Geodynamics*. 2024. Vol. 15(2). P. 189–199. DOI: 10.1016/j.geog.2023.07.006.
18. Косарев Н. С., Шевчук С. О. DiffCalc версия 1.0. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2015661198, 20.10.2015. Заявка № 2015617764 от 26.08.2015. EDN: SHNVCB.
19. Su M., Yang Y., Qiao L., Teng X., Song H. Enhanced multipath mitigation method based on multi-resolution CNR model and adaptive statistical test strategy for real-time kinematic PPP. *Advances in Space Research*. 2021. Vol. 67(2). P. 868–882. DOI: 10.1016/j.asr.2020.10.035.
20. Косарев Н.С. Исследование методики контроля фазовых ГНСС-измерений по имитационным данным. *Вестник СГУГиТ*. 2016. № 1. С. 6–13. EDN: WDHJOT.
21. Косарев Н. С. О необходимости создания отечественного программного обеспечения для автоматизированного геодезического мониторинга. *Вестник СГУГиТ*. 2025. Т. 30, № 3. С. 5–14. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-5-14.
22. Шоломицкий А. А., Косарев Н. С., Дмитриев И. В., Галкин А. И. ГЕОМОН. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025665224, 11.06.2025. Заявка № 2025662026 от 16.05.2025. EDN: LDDJNL

REFERENCES

1. Teunissen, P. J. G., & Montenbruck, O. (2017) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. *Springer International Publishing AG*, 1272 p.
2. Misra, P.N., & Enge, P. (2001) Global Positioning System. Signals, Measurements and Performance. *USA: Ganga-Jamuna Press*, 390 p.
3. Antonovich, K.M. (2006). *Ispol'zovanie sputnikovyyh radionavigacionnyh sistem v geodezii. Use of satellite radio navigation systems in geodesy [Use of satellite radio navigation systems in geodesy]*. Moscow: FSUE «Kartgeocenter», 360 p. [In Russian].
4. Tatarnikov, D. V., Astakhov, A. V., Stepanenko, A. P., Shamatulsky, P. P., Emelyanov, S. N. (2016) Antenna technologies for high precision GNSS positioning. *Antenny [Antennas]*, 10 (230), 77-89. [In Russian].
5. Weitzel, A.V., Zhodzishsky, M.I., & Milyutin, D.S. (2009) Multipath errors of various satellite signals. *Informatsionno-izmeritel'nyye i upravlyayushchiye sistemy. [Information-measuring and control systems]*, 8, 34–41. [In Russian].
6. Lau, L. (2025) Investigations into the residual multipath errors of choke-ring geodetic antennas on GNSS carrier-phase measurements. *GPS Solutions*, 29, 42. DOI: 10.1007/s10291-024-01801-9
7. Kupriyanov, A.O., Neumann, Yu.M., Morozov, D.A., & Perminov, A.Yu. (2017) Design of an algorithm for the analysis of reflections of a navigation signal to study the effect of multipath on GNSS measurements. *Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying» [News of universities “Geodesy and aerial photography”]*, 61(6), 41–44. [In Russian].
8. Perminov, A.Yu., Morozov, D.A., & Kupriyanov, A.O. (2022) Experimental testing of the method for determining the effect of multipath on code and phase measurements from GNSS signals. *Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying» [News of universities “Geodesy and aerial photography”]*, 66(5), 6–13. [In Russian].
9. Zhang, Z., Li, B., Gao, Y., & Shen, Yu. (2019) Real-time carrier phase multipath detection based on dual-frequency C/N0 data. *GPS Solutions*, 23, 7. DOI: 10.1007/s10291-018-0799-6

10. Kubo, N., Kobayashi, K., & Furukawa, R. (2020) GNSS Multipath Detection Using Continuous Time-Series C/N0. *Sensors*, 20, 4059; DOI: 10.3390/s20144059
11. Leick, A., Rapoport, L., & Tatarnikov, D. (2015) *GPS Satellite Surveying*. New York: A Willey-Interscience Publication. 806 p.
12. Joseph, A. (2010) What is the difference between SNR and CN0. *Inside GNSS*, 11, 20–25.
13. Antonovich, K. M., & Kosarev, N. S. (2014) Teaching satellite geodesy amid contradictory terminology and regulatory frameworks. *Aktual'nyye voprosy obrazovaniya [Current Issues in Education]*, 1, 60–63. [In Russian].
14. Kawamoto, S., Takamatsu, N., & Abe, S. (2023) RINGO: A RINEX pre-processing software for multi-GNSS data. *Earth, Planets and Space*, 75(54), 1 – 15.
15. Estey, L., & Meertens, C. (1999) TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data. *GPS Solutions*, 3, 42–49. DOI: 10.1007/PL00012778
16. Abou Galala, M., Kaloop, M.R., Rabah, M.M., & Zeidan, Z.M. (2018) Improving precise point positioning convergence time through TEQC multipath linear combination. *J. Surv. Eng.*, 144, 04018002. DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000250
17. García-Armenteros, J.A. (2024) Quality assessment of the Topo-Iberia CGPS stations and data quality's effects on postfit ionosphere-free phase residuals. *Geodesy and Geodynamics*, 15(2), 189-199 DOI: 10.1016/j.geog.2023.07.006
18. Kosarev, N.S., Shevchuk, S.O. (2015) DiffCalc version 1.0. Certificate of software registration RU 2015661198; applied 2015-08-26, issued 2015-10-20. [in Russian].
19. Su, M., Yang, Y., Qiao, L., Teng, X., & Song, H. (2021) Enhanced multipath mitigation method based on multi-resolution CNR model and adaptive statistical test strategy for real-time kinematic PPP. *Advances in Space Research*, 67(2), 868-882 DOI: 10.1016/j.asr.2020.10.035
20. Kosarev, N. S. (2016) Research method of control phase GNSS measurements based on simulation data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1, 6–13. EDN: WDHJOT [in Russian]
21. Kosarev, N. S. (2025) On the necessity of creating Russian software for automated geodetic monitoring. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 30(3), 5–14. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-5-14 [in Russian]
22. Sholomitskii, A.A., Kosarev, N. S. Dmitriev, I.V., & Galkin, A.I. (2025) GEOMON // Certificate of software registration RU 2025665224; issued 2025-06-11, applied 2025-05-16. EDN: LDDJNL

Об авторах

Николай Сергеевич Косарев – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

About author

Nikolai S. Kosarev – Ph.D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Получено / Received 26.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 08.09.2025

Принята к публикации / Accepted 18.11.2025