



Оценка многолучевости ГНСС-измерений с помощью программного продукта открытого доступа

Н.С. Косарев¹

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия
 kosarevnsk@yandex.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Косарев Н.С. Оценка многолучевости ГНСС-измерений с помощью программного продукта открытого доступа // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 4. С. 8–20. DOI:10.30533/GiA-2025-035.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА многолучевость, ГНСС-измерения, автоматизированная система спутникового мониторинга, RINGO, критерии оценки многолучевости, Международная ГНСС-служба

АННОТАЦИЯ В статье выполнена оценка многолучевости измерений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) с помощью программного продукта RINGO по данным автоматизированной системы геодезического мониторинга одной из высоконапорных гидроэлектростанций Российской Федерации. Выявленные на станциях значения многолучевости оценены по критериям, рекомендованным Международной ГНСС-службой (МГС). По результатам сравнения установлено, что все опорные станции автоматизированной системы геодезического мониторинга соответствуют рекомендованным критериям МГС. Из семи мониторинговых пунктов только один отвечает критериям оценки многолучевости, а на двух выявлены недопустимые значения. Возможной причиной низкого качества спутниковых измерений могут быть препятствия вблизи этих станций, закрывающие радиогоризонт антенны, прерывающие или переотражающие сигналы ГНСС. Рекомендовано в структуру автоматизированной системы геодезического мониторинга включить процедуру предварительного анализа ГНСС-измерений, позволяющего выявить в деформационной сети места, нежелательные для размещения станций, а также при необходимости исключить из последующего анализа координаты мониторинговых пунктов, измерения с которых подвержены сильному влиянию многолучевости. Необходимо также выполнить предварительный анализ ГНСС-измерений на пунктах дифференциальных геодезических станций с целью проверки по критериям МГС, в результате которой данные станции могут быть включены в современную структуру государственной геодезической сети.

1 Введение

Эффект многолучевого распространения сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) возникает во время приема ГНСС-антенной одновременно прямого сигнала спутника и сигнала, отраженного от окружающих ее поверхностей [1, 2]. Таким образом, многолучевость зависит от взаимного положения «спутник — приемник», и величина ошибки в определении положения при неизменном окружении антенны медленно изменяется в течение сеанса измерений. Величина многолучевости также различна для кодовых и фазовых измерений.

При позиционировании по кодовым псевдодалностям (абсолютный или дифференциальный методы) значение многопутности доходит до половины длины чипа, т. е. 150 м для грубого кода и 15 м для точного кода, хотя обычно ошибки намного меньше — около 10 м [3, 4]. Существенно уменьшить вклад ошибки от многолучевости в кодовых измерениях позволяет усреднение результатов за некоторый период времени [5].

Для фазовых псевдодалностей величина многопутности составляет $\frac{1}{4}$ длины волны, что в линейной мере для частоты $L1$ системы GPS (*англ.* Global Positioning System) равно примерно 5–6 см [3, 4]. В случае позиционирования по фазе несущей продолжительные сеансы будут уменьшать влияние многолучевости в окончательных результатах базовой линии [5].

Кроме того, величина многолучевости для спутников GPS обычно повторяется каждые звездные сутки, т. е. каждые следующие сутки на 236 секунд раньше. У спутников ГЛОНАСС геометрия повторяется через 17 витков (7 суток 23 часа 27 минут 27 секунд) [6].

Для уменьшения влияния многолучевости на измерения разработан ряд рекомендаций: размещать ГНСС-антенны в местах с открытым радиогоризонтом, использовать ГНСС-антенны специальных конструкций, разрабатывать уменьшающие или исключаящие этот эффект линейные комбинации измерений, использовать алгоритмы фильтрации измеренных псевдодалностей [7–9].

Для вычисления величины многолучевости на отдельной станции не существует общей математической модели, однако влияние многолучевости на измеренные расстояния до спутников можно оценить комбинацией кодовых и фазовых псевдодалностей [10, 11] или по фазовым разностям через звездные сутки [6]. Другой подход к оценке многолучевости — создание специальных стендов, имитирующих переотраженные ГНСС-сигналы [12].

2 Материалы и методы

2.1 Постановка задачи исследования и выбор программного продукта для ее решения

В настоящее время автоматизированные системы геодезического мониторинга (АСГМ) активно применяются для обеспечения безопасности критических объектов инфраструктуры Российской Федерации. В этих целях используется классическая технология, когда опорные станции устанавливаются на стабильном основании, вне зоны деформаций исследуемого объекта, а мониторинговые станции размещаются в местах ожидаемого наибольшего влияния деформаций, определенных проектными или эксплуатирующими организациями [13, 14]. Нередко эти места характеризуются частично закрытым радиогоризонтом: технологические конструкции или окружающий рельеф блокируют прохождение сигналов ГНСС или отражают их, что в конечном итоге приводит к ошибкам определения координат.

В этой связи на этапе проектирования спутниковой сети АСГМ в местах потенциального размещения опорных и мониторинговых станций следует выполнять тестовые измерения продолжительностью не менее суток, а затем оценивать величину многолучевости. Это позволит выявить в деформационной сети места, нежелательные для размещения станций, а также при необходимости исключить из последующего анализа координаты мониторинговых пунктов, измерения с которых подвержены сильному влиянию многолучевости.

На этапе эксплуатации уже действующей АСГМ следует разработать методику предварительного оценивания величины многолучевости на отдельных станциях, а также выполнять фильтрацию кодовых и фазовых псевдодалностей для исключения из измерений данных, которые вносят ошибку в определение координат. Поэтому основной задачей, поставленной автором в данном исследовании, является обоснование необходимости предварительного анализа ГНСС-данных для определения величины многолучевости и выбор программного продукта для этой оценки.

Согласно рекомендациям Международной ГНСС-службы (МГС) [15], выделяют три критерия для оценки кодовой многолучевости ГНСС-измерений.

Таблица 1 ⬇

Критерии оценки кодовой многолучевости ГНСС-измерений

Table 1

Criteria for assessing GNSS code multipath

Критерий	СКО усредненного значения кодовой многолучевости, м	
	для частоты L1	для частоты L2
REC	0,30	0,30
RF1	0,40	0,60
RF2	0,50	0,75

Примечание. СКО — средняя квадратическая ошибка.

Критерий REC определяется рекомендуемыми руководящими документами МГС относительно качества данных, применимыми как к активным станциям, так и к предлагаемым станциям. Критерий RF1 является критерием качества на более чем половине станций МГС, а критерий RF2 — на двух третях станций [15]. В табл. 1 приведены количественные характеристики каждого критерия.

Определение величины многолучевости ГНСС-измерений реализовано несколькими исследовательскими коллективами в утилитах предварительной обработки данных, таких как TEQC¹, GFZRNX², G-Nut/Anubis, GDP, GDPS, RINGO [16–21]. В табл. 2 приведено сравнение возможностей этих программных продуктов.

Таблица 2 ⬇

Сравнительные характеристики инструментов / утилит предварительной обработки

Table 2

Comparative characteristics of pre-processing tools / utilities

Название программного продукта	Функциональные возможности					
	Поддержка версии RINEX			Редактирование данных	Оценка качества измерений (многолучевость, потери счета циклов и др.)	Графический интерфейс
	2.x	3.x	4.00			
TEQC	+	-	-	+	+	-
GFZRNX	+	+	+	+	+	-
G-Nut/Anubis	+	+	-	+	+	-
GDP	+	+	-	+	*	**
GDPS	+	+	+	+	+	+
RINGO	+	+	+	+	+	**

Примечание. Знаком * обозначается ограниченный функционал, знаком ** — поддержка вывода результатов в различных видах.

В результате сравнения функциональных возможностей программных продуктов в качестве инструмента процедуры оценки многолучевости ГНСС-измерений выбран программный продукт RINGO.

1 Estey L., Meertens C. TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data // GPS Solutions. 1999. Vol. 3. P. 42–49.

2 Nischan T. GFZRNX – RINEX GNSS data conversion and manipulation toolbox. Version 1.05. 2016. 45 p.

2.2 Описание программного продукта RINGO

Программный продукт RINGO разработан коллективом авторов Управления геопространственной информации Японии для предварительной обработки мультиспектрных ГНСС-данных и находится в открытом доступе³.

Данный программный продукт позволяет [21]:

- редактировать RINEX-файлы (объединение файлов, редактирование заголовка, прореживание данных);
- осуществлять проверку качества измерений;
- определять поправку часов ГНСС-приемника;
- выявлять потери счета циклов;
- вычислять ионосферную задержку первого и второго порядка;
- конвертировать файлы BINEX и RTCM в RINEX;
- поддерживать выдачу результатов в интерактивной форме в виде HTML-страницы.

Программный продукт RINGO написан на языке программирования GO и работает в режиме командной строки. Использование данного языка программирования позволяет программному продукту быть совместимым с различными операционными системами, такими как UNIX, Linux, Windows и MacOS, без какой-либо модификации исходного кода.

В настоящее время программное обеспечение RINGO поддерживает версии RINEX 2.xx, 3.0x и 4.00, а также сжатые файлы RINEX, включая сжатие UNIX (.Z), сжатие gzip (.gz), сжатие bzip2 (.bz2) и tar-архивированный файл навигации RINEX (.tar, .tar.Z, .tar.gz и .tar.bz2) для прямого чтения. В табл. 3 приведены типы поддерживаемых файлов.

Таблица 3 ➤

Типы поддерживаемых файлов в программном продукте RINGO

Table 3

Types of supported files in the RINGO software

Тип файла	Версия файла	Тип данных
RINEX	RINEX 2.xx, 3.0x и 4.00	2.10, 2.11, 2.12, 3.00, 3.01, 3.02, 3.03, 3.04, 3.05, 4.00
BINEX	Большой порядок байтов, прямой BINEX	<i>Навигационные данные</i> 0×01–0×01: Эфемериды системы GPS 0×01–0×02: Эфемериды системы ГЛОНАСС 0×01–0×03: Эфемериды системы SBAS 0×01–0×06: Эфемериды системы QZSS 0×01–0×14: Эфемериды системы GALILEO 0 × 7f: ГНСС-наблюдения
RTCM	RTCM10403.3	<i>Навигационные данные:</i> 1019: Эфемериды системы GPS 1020: Эфемериды системы ГЛОНАСС 1044: Эфемериды системы QZSS 1046: Эфемериды системы GALILEO <i>Данные ГНСС-измерений:</i> MSM7 (1077, 1087, 1097, 1117)

Для оценки многолучевости в программном продукте используется линейная комбинация кодовых и фазовых псевдодалностей, имеющая следующий вид [22, 23]:

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

где P_i — кодовая псевдодалность на несущей частоте f_i ;

L_i — фазовая псевдодалность на несущей частоте f_i ;

f_i и f_j — несущая частота i и j сигналов ГНСС.

В линейной комбинации (1) присутствуют не только кодовая многолучевость и шум, но также фазовая многолучевость и шум фазы несущей, фазовая

3 RINGO: RINEX pre-processing tool using Go. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://terras.gsi.go.jp/software/ringo/en> (дата обращения: 15.03.2025).

неоднозначность N и аппаратные задержки. Фазовая многолучевость и шум фазы несущей намного меньше, чем кодовая многолучевость и шум псевдодальности, поэтому фазовую многолучевость и шум фазы несущей можно игнорировать.

Для устранения фазовой неоднозначности N и аппаратных задержек из уравнения (1) выполняется усреднение данных во времени на дуге орбиты спутника [24]:

2 ➤
$$mp_{ij} = MP_{ij} - \frac{\sum_{t=1}^{t=m} MP_{ij}}{m},$$

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

В программном продукте RINGO усреднение данных во времени, по 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 СКО величины mp_{ij} для каждого спутника, а также ее усредненное значение

3 ➤
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n [(mp_{ij})_k - (mp_{ij})_{cp}]^2}{n-1}},$$

где $(mp_{ij})_{cp}$ – среднее значение величины mp_{ij} .

2.3 Исходные данные для предварительного анализа многолучевости

Оценка многолучевости спутниковых измерений с помощью программного продукта RINGO производилась на данных, собранных автором в процессе метрологической поверки ГНСС-приемников [25] АСГМ одной из высоконапорных ГЭС Российской Федерации (рис. 1). На ГЭС развернута АСГМ на базе ГНСС-технологий, состоящая из десяти станций: 7 станций размещены на гребне плотины, а 3 – на бортах русла реки [26]. Установлено ГНСС-оборудование фирмы Leica Geosystems: на гребне плотины – ГНСС-приемники Leica GMX902 GG с ГНСС-антенной LEIAR10, а на бортах русла реки – ГНСС-приемники Leica GR10 с антенной LEIAR25 (рис. 2).

Всего в рамках метрологической поверки были собраны суточные ГНСС-измерения с общей продолжительностью две недели на каждой станции. Дискретность данных составляла 30 секунд.

Рис. 1 ⬇
Общий вид высоконапорной ГЭС РФ [26]

Fig. 1
General view of a high-head hydroelectric power plant in the Russian Federation [26]



Рис. 2 ⬇
Базовая станция «10-й пост» [26]

Fig. 2
The base station “10th Post” [26]



3 Результаты и обсуждение

Собранные суточные ГНСС-измерения с общей продолжительностью две недели на каждой станции были обработаны с помощью программного продукта RINGO. В табл. 4 представлены результаты статистической оценки кодовой многолучевости, наблюдаемые на каждой станции АСГМ, а в табл. 5 показаны результаты анализа соответствия критериям оценки кодовой многолучевости ГНСС-измерений, определенным МГС, каждой станции АСГМ высоконапорной ГЭС.

Таблица 4 ➤

Результаты статистической оценки кодовой многолучевости на каждой станции АСГМ, м

Table 4

Results of statistical assessment of code multipath at each ASGM station, meters

Пункт	Кодовая многолучевость					
	mp_{12}			mp_{21}		
	min	max	mean	min	max	mean
BSBV	0,044	0,092	0,062	0,052	0,112	0,079
B10P	0,118	0,135	0,127	0,122	0,137	0,132
BSLU	0,086	0,096	0,091	0,078	0,098	0,089
S10g	0,449	0,755	0,532	0,463	0,742	0,532
S18g	0,407	0,441	0,419	0,389	0,422	0,404
S25g	0,382	0,437	0,402	0,344	0,400	0,376
S33g	0,366	0,487	0,389	0,319	0,498	0,369
S39g	0,372	0,719	0,602	0,363	0,759	0,619
S45g	0,388	0,400	0,392	0,371	0,437	0,399
S55g	0,215	0,226	0,222	0,215	0,265	0,233

Примечание. Для значений оценки кодовой многолучевости приняты следующие обозначения: **min** – минимальное, **max** – максимальное, **mean** – среднее.

Таблица 5 ➤

Процент соответствия критериям оценки кодовой многолучевости ГНСС-измерений для каждой станции АСГМ

Table 5

Percentage of compliance with the criteria for assessing GNSS code multipath for each ASGM station

Пункт	Кодовая многолучевость					
	mp_{12}			mp_{21}		
	REC	RF1	RF2	REC	RF1	RF2
BSBV	100	100	100	100	100	100
B10P	100	100	100	100	100	100
BSLU	100	100	100	100	100	100
S10g	0	0	47	0	73	93
S18g	0	0	100	0	100	100
S25g	0	67	100	0	100	100
S33g	0	87	100	0	100	100
S39g	0	7	13	0	47	67
S45g	0	100	100	0	100	100
S55g	100	100	100	100	100	100

Из табл. 4 и 5 можно сделать следующие выводы:

1. На всех опорных станциях АСГМ BSBV, B10P, BSLU оцененные величины кодовой многолучевости ГНСС-измерений соответствуют всем рекомендуемым критериям REC, RF1 и RF2. Максимальная СКО величины кодовой многолучевости наблюдается на пункте B10P и составляет 0,137 м.
2. На мониторинговых пунктах АСГМ только пункт S55g отвечает всем рекомендуемым критериям REC, RF1 и RF2, максимальная СКО величины кодовой многолучевости составляет 0,265 м.

- Из десяти мониторинговых пунктов только восемь удовлетворяют критерию RF2, на которых среднее значение СКО величины кодовой многолучевости равно приблизительно 0,4 м.
- Две мониторинговые станции S10g и S39g не отвечают всем рекомендуемым критериям REC, RF1 и RF2. Это может объясняться тем, что вблизи этих станций имеются препятствия, ухудшающие качество приема сигналов ГНСС-антенной.

На рис. 3–5 представлены результаты оценки многолучевости по формуле (2) для опорного пункта BSBV, соответствующего всем рекомендуемым критериям МГС, и для мониторинговых станций S10g и S39g, не отвечающих всем рекомендуемым критериям МГС.

Для оценки многолучевости ГНСС-измерений АСГМ дополнительно был использован критерий, определяющий процентную долю пунктов в сети, на которых СКО величины кодовой многолучевости не должна превышать 0,5 м на частотах L1 и L2 [27]. Если величина составляет более 85 %, то такая ГНСС-сеть (в частности, деформационная сеть ГЭС) может расцениваться как устойчивая к влиянию погрешности, вызванной эффектом многопутности. В рассматриваемом случае величина составляет 80 %, и сеть не может считаться таковой. Стоит отметить, что даже не все пункты Фундаментальной астрономо-геодезической сети, составляющие опорную основу Российской Федерации, удовлетворяют этому критерию [28].

Рис. 3  Результаты оценки многолучевости для пункта BSBV

Fig. 3 Results of multipath assessment for BSBV monitoring point

Условные обозначения

-  СКО усредненного значения величины mp_{12} в метрах, характеризующая кодовую многолучевость на частоте L1
-  СКО усредненного значения величины mp_{21} в метрах, характеризующая кодовую многолучевость на частоте L2

156/2019 день от начала года / год, на который были получены ГНСС-измерения

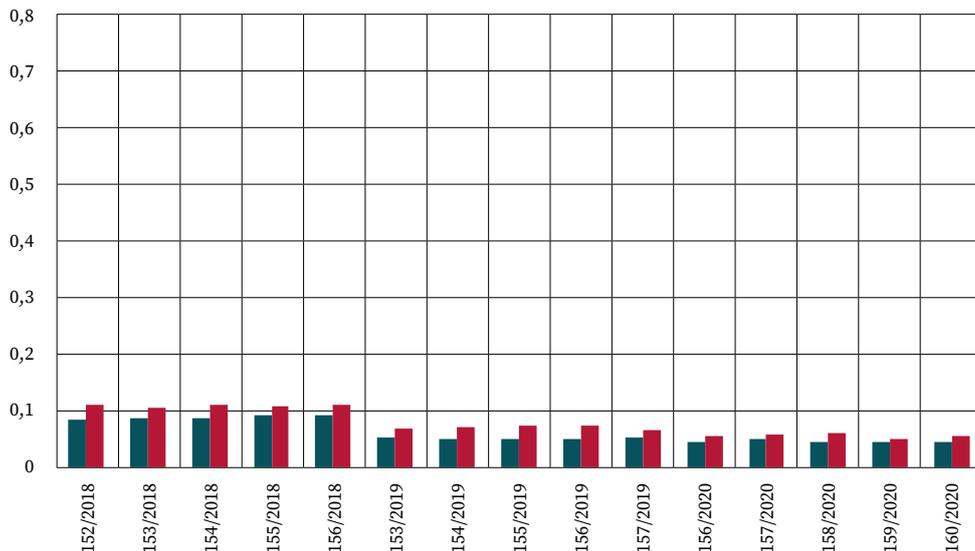


Рис. 4  Результаты оценки многолучевости для пункта S10g

Fig. 4 Results of multipath assessment for S10g monitoring point

Условные обозначения

-  СКО усредненного значения величины mp_{12} в метрах, характеризующая кодовую многолучевость на частоте L1
-  СКО усредненного значения величины mp_{21} в метрах, характеризующая кодовую многолучевость на частоте L2

156/2019 день от начала года / год, на который были получены ГНСС-измерения

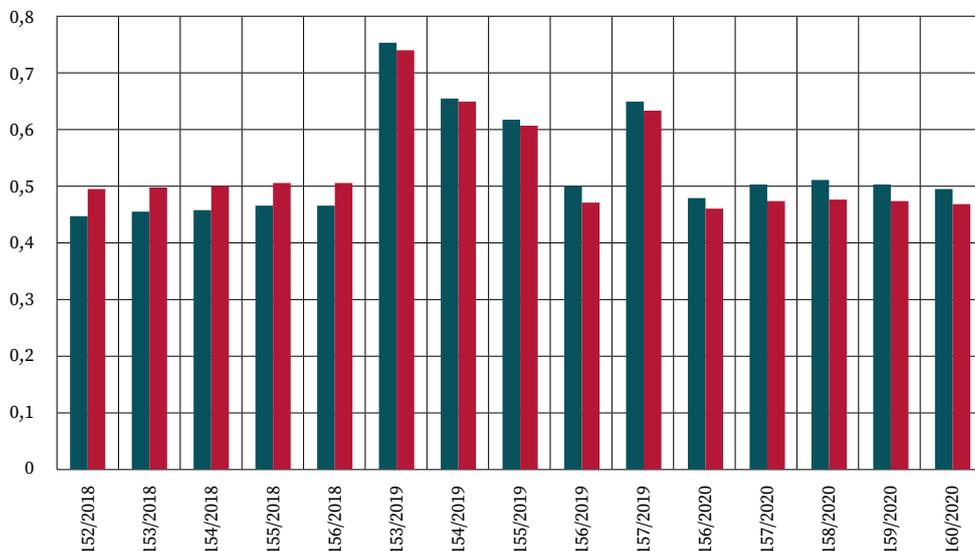


Рис. 5

Результаты оценки многолучевости для пункта S39g

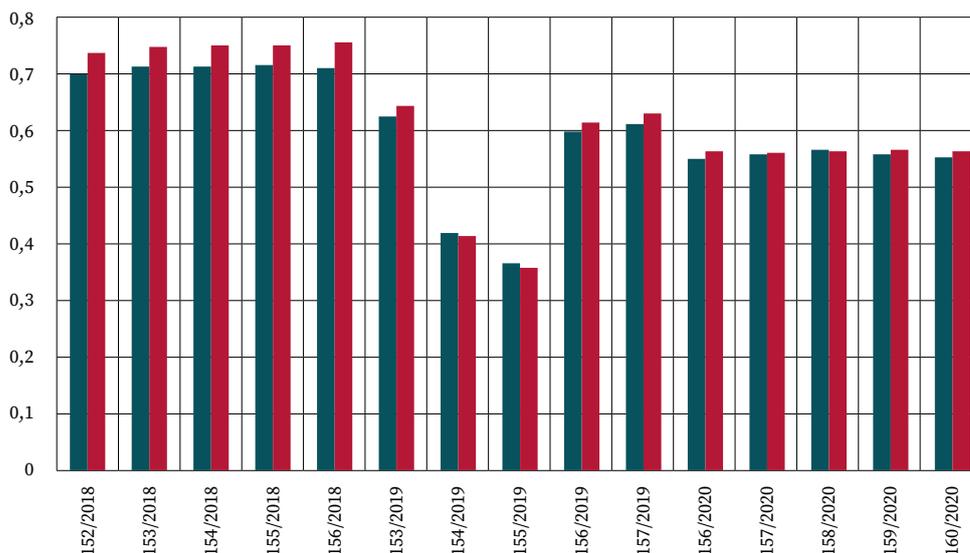
Fig. 5

Results of multipath assessment for S39g monitoring point

Условные обозначения

- СКО усредненного значения величины mp_{12} в метрах, характеризующая кодовую многолучевость на частоте L1
- СКО усредненного значения величины mp_{21} в метрах, характеризующая кодовую многолучевость на частоте L2

156/2019 день от начала года / год, на который были получены ГНСС-измерения



4 Выводы

В статье выполнена оценка многолучевости спутниковых измерений с помощью программного продукта RINGO на данных, собранных автором в процессе метрологической поверки ГНСС-приемников АСГМ одной из высоконапорных ГЭС Российской Федерации. Полученные результаты сравнивались с критериями оценки кодовой многолучевости ГНСС-измерений, определенными МГС. По результатам сравнения было установлено, что все опорные станции АСГМ BSBV, B10P, BSLU соответствуют рекомендуемым критериям, которые декларированы МГС, а среди мониторинговых пунктов АСГМ только пункт S55g отвечает всем критериям. На двух мониторинговых пунктах (S10g и S39g) из семи оценка многолучевости спутниковых измерений не отвечает рекомендуемым критериям. Это может объясняться тем, что вблизи указанных станций имеются препятствия, ухудшающие качество приема сигналов ГНСС-антенной.

Другим критерием для оценки многолучевости спутниковых измерений выступала процентная доля пунктов в сети со значениями СКО величины кодовой многолучевости mp_{12} и mp_{21} , не превышающими 0,5 м. Эта доля должна составлять более 85 %. Согласно результатам исследования, для автоматизированной системы спутникового мониторинга высоконапорной ГЭС РФ рассматриваемая величина равна 80 %. Это также можно объяснить тем, что вблизи данных станций имеются препятствия, ухудшающие качество приема сигналов ГНСС-антенной.

Полученные результаты показывают, что следует включать в структуру АСГМ процедуру предварительного анализа ГНСС-измерений. Это позволит выявить в деформационной сети слабые места, а также при необходимости исключить из последующего анализа координаты мониторинговых пунктов, измерения с которых подвержены сильному влиянию многолучевости.

Рекомендуется также выполнить предварительный анализ ГНСС-измерений на пунктах дифференциальных геодезических станций с целью их проверки по критериям МГС, по результатам которой они могут быть включены в современную структуру государственной геодезической сети.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Teunissen P.J.G., Montenbruck O. (eds.). 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. Lincoln: Ganga-Jamuna Press, 2001. 390 p.
3. Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D. GPS Satellite Surveying. New York: A Willey-Interscience Publication, 2015. 806 p.
4. Kosarev N.S., Antonovich K.M., Lipatnikov L.A. The method of cycle-slip detection and repair GNSS measurements by using receiver with high stability frequency oscillator // Contributions to Geophysics and Geodesy. 2019. Vol. 49. No. 3. P. 283–301. DOI:10.2478/congeo-2019-0015.
5. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: монография: в 2 т. М.: Картогеоцентр, 2006. Т. 2. 360 с.
6. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: монография: в 2 т. М.: Картогеоцентр, 2005. Т. 1. 334 с.
7. Татарников Д.В., Астахов А.В., Степаненко А.П. и др. Антенные технологии высокоточного спутникового позиционирования // Антенны. 2016. № 10 (230). С. 77–89.
8. 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.
9. Lau L. Investigations into the residual multipath errors of choke-ring geodetic antennas on GNSS carrier-phase measurements // GPS Solutions. 2025. Vol. 29. P. 42. DOI:10.1007/s10291-024-01801-9.
10. Куприянов А.О., Нейман Ю.М., Морозов Д.А. и др. Разработка алгоритма анализа переотражений навигационного сигнала для изучения влияния многолучевости на ГНСС-измерения // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2017. № 6. С. 41–44.
11. Куприянов А.О., Морозов Д.А., Перминов А.Ю. Методика численного определения влияния многолучевости на кодовые и фазовые измерения по сигналам ГНСС // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2020. Т. 64, № 4. С. 391–398. DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-4-391-398.
12. 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.
13. Кафтан В.И., Устинов А.В. Применение глобальных навигационных спутниковых систем для мониторинга деформаций гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2012. № 12. С. 11–19.
14. Устинов А.В. Технология спутникового геодезического мониторинга гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2014. № 6. С. 39–43.
15. 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. No. 2. P. 189–199. DOI:10.1016/j.geog.2023.07.006.
16. Galdyn F., Zajdel R., Sośnica K. RINEXAV: GNSS global network selection open-source software based on qualitative analysis of RINEX files // SoftwareX. 2023. Vol. 22. P. 101372. DOI:10.1016/j.softx.2023.101372.
17. Bălă A.C., Drăgulescu B.C., Brebu F.-M. Analyzing Rinex data files using the Python programming language // Journal of applied engineering sciences. 2024. Vol. 14. No. 1. P. 167–177. DOI:10.2478/jaes-2024-0021.
18. Václavovic P., Dousa J. G-Nut/Anubis – open-source tool for multi-GNSS data monitoring // International Association of Geodesy Symposia. 2015. Vol. 143. P. 775–782. DOI:10.1007/1345_2015_97.
19. Chen Z., Cui Y., Li L., et al. GDP: an open-source GNSS data preprocessing toolkit // GPS Solutions. 2020. Vol. 24. P. 87. DOI:10.1007/s10291-020-01003-z.
20. Lu L., Hu W., Wu T. GDPS: an open-source python-based software package for multi-GNSS data preprocessing // GPS Solutions. 2024. Vol. 28. P. 138. DOI:10.1007/s10291-024-01678-8.

21. Kawamoto S., Takamatsu N., Abe S. RINGO: A RINEX pre-processing software for multi-GNSS data // Earth, Planets and Space. 2023. Vol. 75. P. 54. DOI:10.1186/s40623-023-01811-w.
22. Shi C., Zhao Q., Hu Z. Precise relative positioning using real tracking data from COMPASS GEO and IGSO satellites // GPS Solutions. 2013. Vol. 17. No. 1. P. 103–119. DOI:10.1007/s10291-012-0264-x.
23. Wang G., de Jong K., Zhao Q., et al. Multipath analysis of code measurements for BeiDou geostationary satellites // GPS Solutions. 2015. Vol. 19. P. 129–139. DOI:10.1007/s10291-014-0374-8.
24. Abou Galala M., Kaloop M.R., Rabah M.M., et al. Improving precise point positioning convergence time through TEQC multipath linear combination // Journal of Surveying Engineering. 2018. Vol. 144. P. 04018002. DOI:10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000250.
25. Карпик А.П., Косарев Н.С., Антонович К.М. и др. Методика метрологической поверки ГНСС приемников системы мониторинга высоконапорной ГЭС // Вестник СГУГиТ. 2019. Т. 24, № 4. С. 34–43.
26. Бернд Х., Сухов И.В., Ли В.Т. Автоматизированная система деформационного мониторинга (АСДМ) на Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехника. 2015. № 2. С. 12–15.
27. Yaxuan H., Lin Ch., Xiong W. Quality analysis of the campaign GPS stations observation in Northeast and North China // Geodesy and Geodynamics. 2016. Vol. 7. No. 2. P. 87–94. DOI:10.1016/j.geog.2016.03.008.
28. Терещенко В.Е. Анализ качества спутниковых измерений с помощью программной утилиты TEQC // Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25, № 3. С. 72–88. DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-3-72-88.

АВТОР Косарев Николай Сергеевич

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»,
Новосибирск, Россия
кафедра инженерной геодезии и маркшейдерского дела,
факультет геодезии и менеджмента
канд. техн. наук, доцент
 0000-0003-1806-3651

Поступила 21.03.2025. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликовано 29.08.2025.



Assessment of GNSS multipath effects using open source software

Nikolai S. Kosarev¹ 

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
 kosarevnsk@yandex.ru

CITATION Kosarev NS. Assessment of GNSS multipath effects using open source software. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(4): 8–20. DOI:10.30533/GiA-2025-035.

KEYWORDS multipath, GNSS measurements, automated satellite monitoring system, RINGO, criteria for assessing multipath, International GNSS Service

ABSTRACT The article evaluates the multipath effect in GNSS measurements using the RINGO software based on data from an automated geodetic monitoring system of one of the high-pressure hydroelectric power plants in the Russian Federation. The identified multipath values at the stations were assessed according to the criteria recommended by the International GNSS Service (IGS). The comparison results revealed that all reference stations of the automated geodetic monitoring system meet the IGS recommended criteria. Out of seven monitoring points, only one satisfies the multipath evaluation criteria, while two points exhibit unacceptable values. The possible cause of the low quality of satellite measurements at these stations could be obstacles near the stations that block the antenna's radio horizon, interrupt, or reflect GNSS signals. It is recommended to include a preliminary analysis of GNSS measurements in the structure of the automated geodetic monitoring system. This analysis would help identify unsuitable locations for station placement in the deformation network and, if necessary, exclude the coordinates of monitoring points affected by significant multipath interference from further analysis. Additionally, it is recommended to conduct a preliminary analysis of GNSS measurements at differential geodetic stations to verify their compliance with IGS criteria. Based on this analysis, they could be integrated into the current structure of the State Geodetic Network.

ACKNOWLEDGEMENTS The author expresses gratitude to Elena Konstantinovna Lagutina, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, Siberian State University of Geosystems and Technologies, for her valuable comments and suggestions that improved the content of this article.

- REFERENCES**
1. Teunissen PJG, Montenbruck O (eds.) *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer International Publishing AG; 2017. 1272 p.
 2. Misra PN, Enge P. *Global Positioning System. Signals, Measurements and Performance*. Lincoln: Ganga-Jamuna Press; 2001. 390 p.
 3. Leick A, Rapoport L, Tatarnikov D. *GPS Satellite Surveying*. New York: A Willey-Interscience Publication; 2015. 806 p.
 4. Kosarev NS, Antonovich KM, Lipatnikov LA. The method of cycle-slip detection and repair GNSS measurements by using receiver with high stability frequency oscillator. *Contributions to Geophysics and Geodesy*. 2019;49(3): 283–301. DOI:10.2478/congeo-2019-0015.
 5. Antonovich KM. *Ispol'zovanie sputnikovyyh radionavigacionnyh sistem v geodezii* [Use of satellite radio navigation systems in geodesy] [monograph]. In 2 vols. Vol. 2. Moscow: Kartgeocenter; 2006. 360 p. (In Russian).
 6. Antonovich KM. *Ispol'zovanie sputnikovyyh radionavigacionnyh sistem v geodezii* [Use of satellite radio navigation systems in geodesy] [monograph]. In 2 vols. Vol. 1. Moscow: Kartgeocenter; 2005. 334 p. (In Russian).
 7. Tatarnikov DV, Astakhov AV, Stepanenko AP, et al. Antennyye tehnologii vysokotochnogo sputnikovogo pozicionirovaniya [Antenna technologies for high precision GNSS positioning]. *Journal Antennas*. 2016;10(230): 77–89. (In Russian).
 8. Weitzel AV, Zhodzishsky MI, Milyutin DS. Oshibki mnogoluchevosti dlja razlichnyh sputnikovyyh signalov [Multipath errors of various satellite signals]. *Information-measuring and control systems*. 2009;8: 34–41. (In Russian).
 9. Lau L. Investigations into the residual multipath errors of choke-ring geodetic antennas on GNSS carrier-phase measurements. *GPS Solutions*. 2025;29: 42. DOI:10.1007/s10291-024-01801-9.
 10. Kupriyanov AO, Neumann YuM, Morozov DA, et al. Razrabotka algoritma analiza pereotrazhenij navigacionnogo signala dlja izuchenija vlijaniya mnogoluchevosti na GNSS-izmereniya [Design of an algorithm for the analysis of reflections of a navigation signal to study the effect of multipath on GNSS measurements]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2017;61(6): 41–44. (In Russian).
 11. Kupriyanov AO, Morozov DA, Perminov AYu. Metodika chislennogo opredeleniya vlijaniya mnogoluchevosti na kodovye i fazovye izmereniya po signalam GNSS [Methodology for numerical determination of the multipath interference on code and phase measurements from GNSS signals]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2020;64(4): 391–398. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-4-391-398.
 12. Perminov AYu, Morozov DA, Kupriyanov AO. Jeksperimental'naja aprobacija metodiki opredeleniya vlijaniya mnogoluchevosti na kodovye i fazovye izmereniya po signalam GNSS [Experimental testing of the method for determining the effect of multipath on code and phase measurements from GNSS signals]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2022;66(5): 6–13. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-5-6-13.
 13. Kaftan VI, Ustinov AV. Primenenie global'nyh navigacionnyh sputnikovyyh sistem dlja monitoringa deformatsij gidrotehnicheskikh sooruzhenij [Use of global navigation satellite systems for monitoring deformations of hydraulic constructions]. *Hydraulic engineering*. 2012;12: 11–19 (In Russian).
 14. Ustinov AV. Tehnologija sputnikovogo geodezicheskogo monitoringa gidrotehnicheskikh sooruzhenij [Technology of satellite geodetic monitoring of hydropower structures]. *Hydraulic engineering*. 2014;6: 39–43 (In Russian).
 15. García-Armenteros JA. Quality assessment of the Topo-Iberia CGPS stations and data quality's effects on postfit ionosphere-free phase residuals. *Geodesy and Geodynamics*. 2024;15(2): 189–199. DOI:10.1016/j.geog.2023.07.006.
 16. Gałdyn F, Zajdel R, Sośnica K. RINEXAV: GNSS global network selection open-source software based on qualitative analysis of RINEX files. *SoftwareX*. 2023;22: 101372. DOI:10.1016/j.softx.2023.101372.
 17. Bălă AC, Drăgulescu BC, Brebu FM. Analyzing Rinex data files using the Python programming language. *Journal of applied engineering sciences*. 2024;14(1): 167–177. DOI:10.2478/jaes-2024-0021.

18. Václavovic P, Dousa J. G-Nut/Anubis – open-source tool for multi-GNSS data monitoring. *International Association of Geodesy Symposia*. 2016;143: 775–782. DOI:10.1007/13 45_2015_97.
19. Chen Z, Cui Y, Li L, et al. GDP: an open-source GNSS data preprocessing toolkit. *GPS Solutions*. 2020;24: 87. DOI:10.1007/s10291-020-01003-z.
20. Lu L, Hu W, Wu T. GDPS: an open-source python-based software package for multi-GNSS data preprocessing. *GPS Solutions*. 2024;28: 138. DOI:10.1007/s10291-024-01678-8.
21. Kawamoto S, Takamatsu N, Abe S. RINGO: A RINEX pre-processing software for multi-GNSS data. *Earth, Planets and Space*. 2023;75: 54. DOI:10.1186/s40623-023-01811-w.
22. Shi C, Zhao Q, Hu Z. Precise relative positioning using real tracking data from COMPASS GEO and IGSO satellites. *GPS Solutions*. 2013;17(1): 103–119. DOI:10.1007/s10291-012-0264-x.
23. Wang G, de Jong K, Zhao Q, et al. Multipath analysis of code measurements for BeiDou geostationary satellites. *GPS Solutions*. 2015;19: 129–139. DOI:10.1007/s10291-014-0374-8.
24. Abou Galala M., Kaloop M.R., Rabah M.M., et al. Improving precise point positioning convergence time through TEQC multipath linear combination. *Journal of Surveying Engineering*. 2018;144: 04018002. DOI:10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000250.
25. Karpik AP, Kosarev NS, Antonovich KM, et al. Method of metrological inspection of GNSS receivers of a high-connector HEPS monitoring system. *Vestnik SSUGT*. 2019;24(4): 34–43 (In Russian).
26. Hiller B, Li VT, Sukhov IV. Avtomatizirovannaja sistema deformacionnogo monitoringa (ASDM) na Sajano-Shushenskoj GJeS [Automated deformation monitoring system (ASDM) at the Sayano-Shushenskaya HPP]. *Gidrotehnika*. 2014;4(4): 36–43 (In Russian).
27. Yaxuan H, Lin Ch, Xiong W. Quality analysis of the campaign GPS stations observation in Northeast and North China. *Geodesy and Geodynamics*. 2016;7(2): 87–94. DOI:10.1016/j.geog.2016.03.008.
28. Tereshchenko VE. Analiz kachestva sputnikovyh izmerenij s pomoshh'ju programmnoj utility TEQC [Quality analysis of GNSS observations of reference stations network with the TEQC utility]. *Vestnik SSUGT*. 2020;25(3): 72–88 (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-3-72-88.

AUTHOR Nikolai S. Kosarev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
 Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying,
 Faculty of Geodesy and Management
 PhD in Engineering, Associate Professor

 0000-0003-1806-3651

Submitted: March 21, 2025. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.