

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.24>

УДК: 621.396.969

## **ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗНОСТИ ФАЗ В ПАССИВНОЙ БИСТАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ГНСС-РАДИОЛОКАЦИИ НА БАЗЕ ПРОГРАММНОГО ПРИЕМНИКА**

**В.Ф. Фатеев<sup>1</sup>, А.В. Ксендзук<sup>1,2</sup>, В.П. Лопатин<sup>1</sup>, Д.А. Артюшев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> **Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических  
и радиотехнических измерений  
141570, Московская обл., р.п. Менделеево, промзона ФГУП «ВНИИФТРИ»**

<sup>2</sup> **Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел»  
125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10, корп.1**

Статья поступила в редакцию 16 октября 2024 г.

**Аннотация.** Метод пассивной бистатической радиолокации, использующий отраженные от поверхности Земли сигналы глобальных навигационных спутниковых систем, может быть использован для определения и мониторинга различных геофизических параметров отражающей поверхности. Большинство архитектур приемников для данного метода основаны на специализированных аппаратных приемных устройствах, однако технология программного приема (SDR) быстро развивается в последние годы и позволяет обрабатывать сигналы в реальном времени, что позволяет на ее основе разработать систему бистатической ГНСС-радиолокации. В статье проанализировано, что использование программного приемника позволит принимать и обрабатывать существующие и будущие сигналы всех группировок ГНСС. Проведены эксперименты с различными параметрами разных программных приемников, которые показали стабильность разности фаз между приемными каналами. Показано, что для некоторых видов программных приемников наблюдается

улучшение погрешности измерений разности фаз при синхронизации от внешнего опорного генератора.

**Ключевые слова:** бистатическая радиолокация, глобальные навигационные спутниковые системы, ГНСС-рефлектометрия, программный приемник.

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-67-10007, <https://rscf.ru/project/23-67-10007/>.

**Автор для переписки:** Лопатин Владислав Павлович, [lopatin@vniiftri.ru](mailto:lopatin@vniiftri.ru)

## **Введение**

В настоящее время широко используется метод бистатической радиолокации поверхности Земли, использующий сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в качестве сигналов радиоподсвета. За рубежом такой метод получил название ГНСС-рефлектометрия (GNSS-R). Этот метод дистанционного зондирования основывается на использовании прямых и отраженных от поверхности Земли ГНСС-сигналов L-диапазона. Данный метод используется для решения таких практических задач как: альтиметрия океана [1], оценка взволнованности морской поверхности [2], оценка влажности почвы [3], а также мониторинг ледовой обстановки [4]. Использование метода ГНСС-рефлектометрии для наблюдения за Землей дает следующие преимущества:

- глобальность покрытия измерениями;
- большой пространственный охват измерений, связанный с тем, что при одном проходе КА-носителя возможно одновременное получение нескольких десятков отражающих треков (соответствует числу видимых навигационных спутников радиоподсвета из числа ГЛОНАСС/GPS/Galileo/BeiDou и др.);
- низкое энергопотребление, так как устанавливаемая на борт аппаратура системы ГНСС-радиолокации является только приемной;
- низкая чувствительность к атмосферным возмущениям;
- высокая точность координатной и временной привязки измерений.

Бортовая бистатическая радиолокационная система (БРЛС), использующая для радиоподсвета поверхности океана сигналы спутников ГНСС, в свой состав должна включать: антенну в «зенит», антенну в «надир», приемное устройство и устройство для обработки принятых сигналов.

На борту КА-носителя (например, наноспутника) принимаются прямые сигналы от каждого спутника ГНСС и сигналы, отраженные от поверхности Земли. Прямые сигналы принимаются антенной, направленной в «зенит», отраженные сигналы принимаются антенной, направленной в «надир» (рис. 1). Наибольшей мощностью обладают сигналы, отраженные от водной поверхности и от поверхности льда в области зеркального отражения (угол падения равен углу отражения).

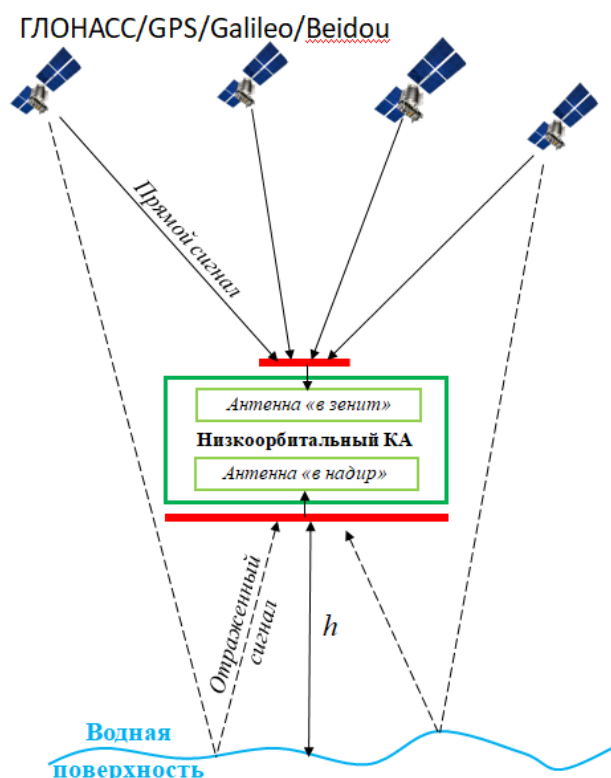


Рис. 1. Геометрия работы БРЛС на сигналах ГНСС.

Отраженный навигационный сигнал от взволнованной водной поверхности вблизи точки зеркального отражения может быть некогерентно и когерентно отраженным. Для решения задачи измерения высоты Мирового океана необходимо определить разность путей распространения сигналов,

которая пропорциональна задержке приема сигнала, отраженного от поверхности океана в точке зеркального отражения, относительно момента приема прямого сигнала. Эта разность хода может быть оценена несколькими способами: из наблюдений отношения сигнал/шум [5], из оценки разности задержек по коду сигнала [6], а также из оценки разности длин путей распространения сигнала по фазе несущей [7]. Погрешность определения высоты по коду в зависимости от мощности принимаемого сигнала составляет от дециметра до нескольких метров [8-10].

Погрешность определения высоты уровня водной поверхности или льда при когерентном отражении по оценкам разности длин путей распространения сигнала по фазе несущей может достигать нескольких сантиметров [11-13].

Таким образом, точная оценка разности фаз между прямым и отраженным сигналом делает возможным использование БРЛС по сигналам ГНСС для решения задачи альтиметрии с погрешностью существующих активных спутниковых альтиметров [14].

Вычисление высоты геоида в задаче альтиметрии возможно с использованием известных алгоритмов на основе измерений фазовой задержки отраженного сигнала относительно прямого [15,16]. Измеренную разность фаз отраженного и прямого сигналов можно представить в виде:

$$\delta\varphi = \delta\varphi_{\text{геом}} + \delta\varphi_{\text{ион}} + \delta\varphi_{\text{троп}} + \delta\varphi_{\text{волн}} + \delta\varphi_{\text{прилив}} + \delta\varphi_{\text{инст}},$$

где  $\delta\varphi_{\text{геом}}$  – разность фаз, связанная с распространением сигналов в пространстве;  $\delta\varphi_{\text{ион}}, \delta\varphi_{\text{троп}}$  – разность фаз связанная с прохождением сигналов через разные участки ионосферы и двойное прохождение отраженного сигнала через тропосферу,  $\delta\varphi_{\text{эм}}$  – разность фаз, вызванная изменением фазы при отражении сигнала от взволнованной поверхности,  $\delta\varphi_{\text{прилив}}$  – разность фаз за счет океанических приливов,  $\delta\varphi_{\text{инст}}$  – разность фаз, вызванная работой приемной аппаратуры.

Все составляющие в соотношении (1) кроме  $\delta\varphi_{\text{инст}}$  либо вычисляются теоретически или по моделям, либо оцениваются из многочастотных измерений. Поэтому необходимо оценить стабильность разности фаз, вызванной работой приемника.

Существует два основных типа приемников, которые могут быть использованы для создания космической БРЛС на сигналах ГНСС: полностью аппаратный приемник и программный приемник, известный как SDR (Software-defined radio). Преимуществом программного приемника является гибкость в настройке параметров функционирования: усиление, частота дискретизации, полоса принимаемого сигнала. Также использование программного приемника дает возможность использования различных алгоритмов обработки за счет представления сигнала в удобном цифровом виде. Благодаря упомянутым преимуществам программный приемник подходит для создания БРЛС на сигналах ГНСС, а также для отработки различных алгоритмов.

Таким образом, задача состоит в оценке стабильности измерения разности фаз сигналов, принимаемых программным приемником. Измерение разности фаз требует применения когерентного приема на двух каналах программного приемника. В качестве приемных устройств БРЛС могут выступать Nuand BladeRF и Luowave USRP X310.

Измерения по оценке разности фаз заключались в следующем: на два канала приемника (BladeRF или USRP X310) через тройник подавался ФКМ-сигнал с генератора сигналов (рис. 2). Генератор сигналов имел возможность работать от внешнего опорного генератора (ОГ), что позволило обеспечить долговременную стабильность параметров формируемого сигнала. Сигнал усиливался, переносился на промежуточную частоту, фильтровался и оцифровывался программным приемником, оцифрованная выборка сигналов с двух каналов поступала для обработки в реальном времени на компьютер (ПК).

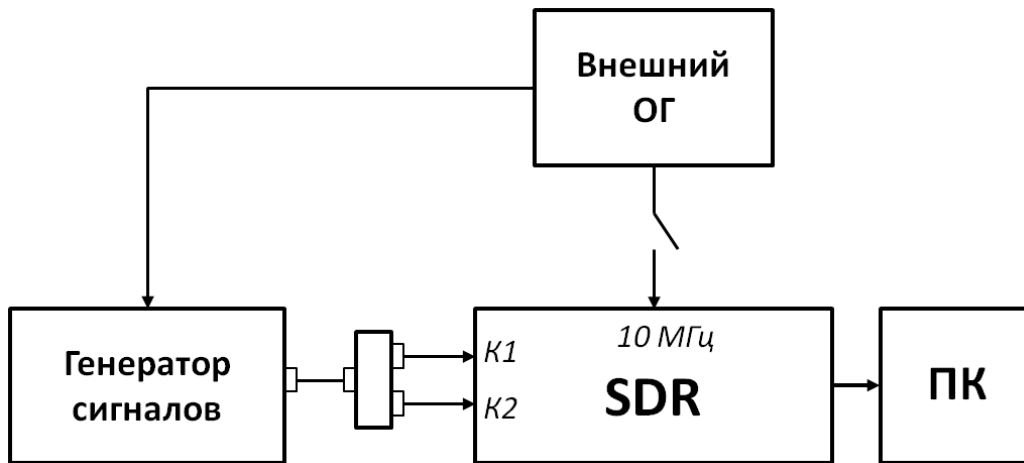


Рис. 2. Схема проведения измерений.

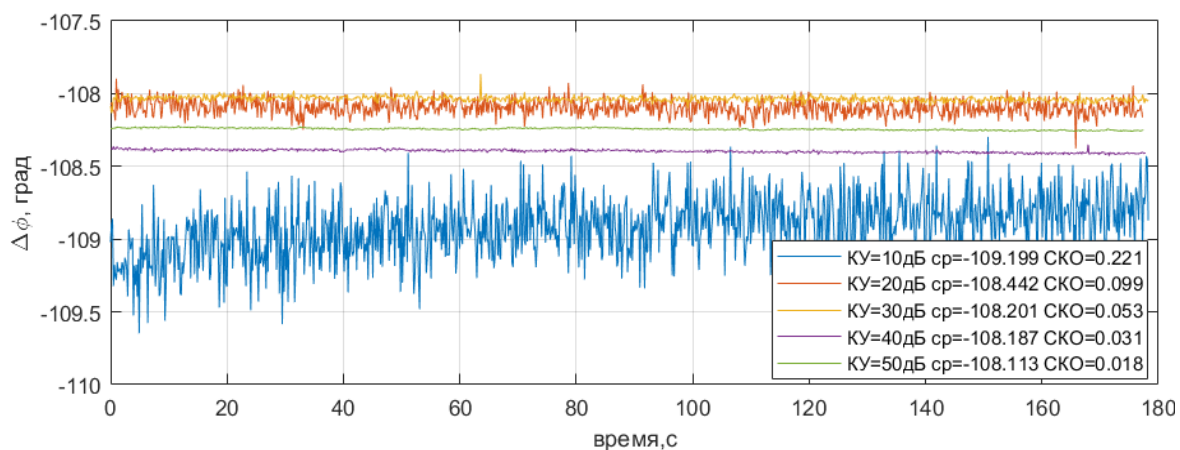
Вычисление разности фаз двух сигналов каналов K1 и K2 описывается выражением:

$$\Delta\varphi = \arg\left(\frac{S_1(\omega_0)}{S_2(\omega_0)}\right) = \arg\left(\frac{|S_1(\omega_0)| \cdot \exp(i\varphi_1(\omega_0))}{|S_2(\omega_0)| \cdot \exp(i\varphi_2(\omega_0))}\right),$$

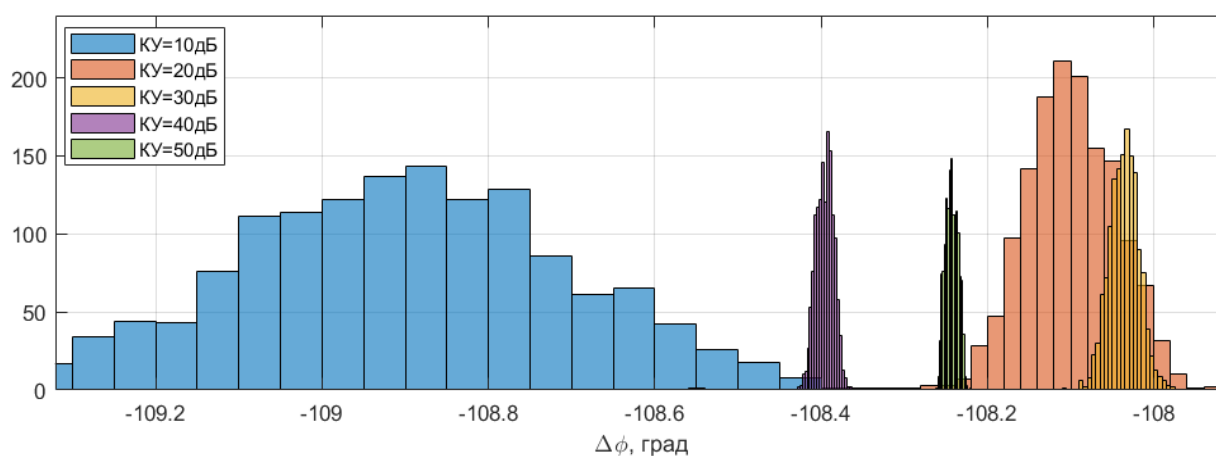
где  $S_1(\omega_0), S_2(\omega_0)$  – значение величины комплексного спектра сигнала с удаленной модуляции на частоте  $\omega_0$ ;  $|S(j\omega_0)|$  – значение АЧХ сигнала на частоте  $\omega_0$ ;  $\varphi(j\omega_0)$  – значение ФЧХ сигнала на частоте  $\omega_0$ .

В работе проведена **серия экспериментов**:

1) В качестве программного приемника использовался **USRP X310** в режиме синхронизации приемных каналов от внутреннего опорного генератора. Измерения проводились при различных коэффициентах усиления (КУ) USRP X310 на интервале времени 180 с (рис. 3). Эксперимент показал, что разброс оценок разности фаз различных записей составляет около  $0.9^\circ$ , при этом СКО измерений каждой записи составляет от  $0,2^\circ$  до  $0,007^\circ$  (таб. 1). В оценках фазы не наблюдается значительного дрейфа значений, который мог бы влиять на погрешность измерений.



а



б

Рис. 3. а) Измерения разности фаз при различных КУ USRP  
 б) гистограммы распределения разности фаз при различных КУ USRP.

Таблица 1. Результаты оценки  $\Delta\varphi$  SDR USRP с внутренним ОГ.

| Коэффициент усиления, дБ | Среднее значение $\Delta\varphi$ , град | СКО $\Delta\varphi$ , град |
|--------------------------|---|----------------------------|
| 10                       | -109,199                                | 0,221                      |
| 20                       | -108,442                                | 0,099                      |
| 30                       | -108,201                                | 0,053                      |
| 40                       | -108,187                                | 0,031                      |
| 50                       | -108,113                                | 0,018                      |

2) В качестве программного приемника использовался **USRP X310** в режиме синхронизации приемных каналов от внешнего опорного генератора. Измерения проводились при различных коэффициентах усиления (КУ) USRP X310 на интервале времени 180 с (таб. 2).

Таблица 2. Результаты оценки  $\Delta\varphi$  SDR USRP с внешним ОГ.

| Коэффициент усиления, дБ | Среднее значение $\Delta\varphi$ , град | СКО $\Delta\varphi$ , град |
|--------------------------|---|----------------------------|
| 10                       | -108,442                                | 0,099                      |
| 20                       | -108,201                                | 0,053                      |
| 30                       | -108,113                                | 0,018                      |
| 40                       | -108,447                                | 0,007                      |
| 50                       | -108,275                                | 0,004                      |

Таким образом, первые два эксперимента показали, что при работе программного приемника USRP X310 от внешнего высокостабильного опорного генератора разброс оценок разности фаз уменьшается от 2 до 4 раз на коротких интервалах измерения в несколько минут. На длительных интервалах (более 10 минут) измерения (рис. 4) разности фаз SDR с внешним и внутренним ОГ существенно не отличаются (СКО измерений с внутренним ОГ равно  $0,012^\circ$ , СКО измерений с внешним ОГ равно  $0,009^\circ$ ).

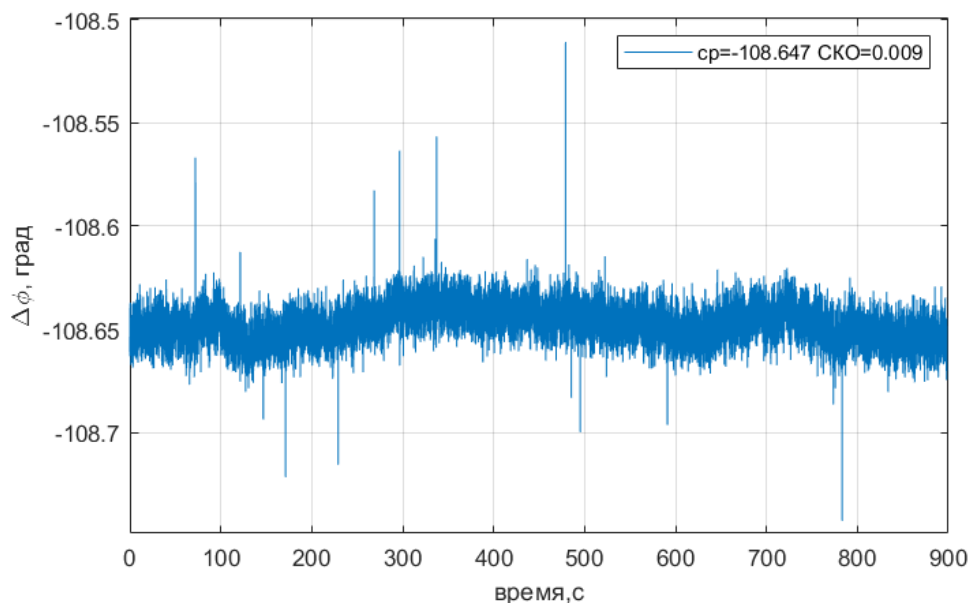
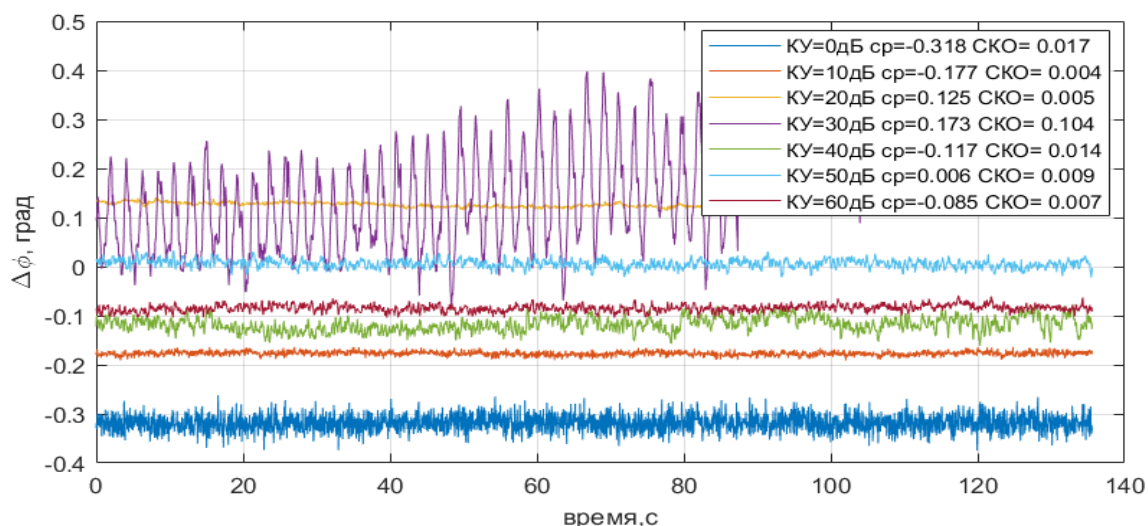


Рис. 4. Измерения разности фаз интервале 900 с.

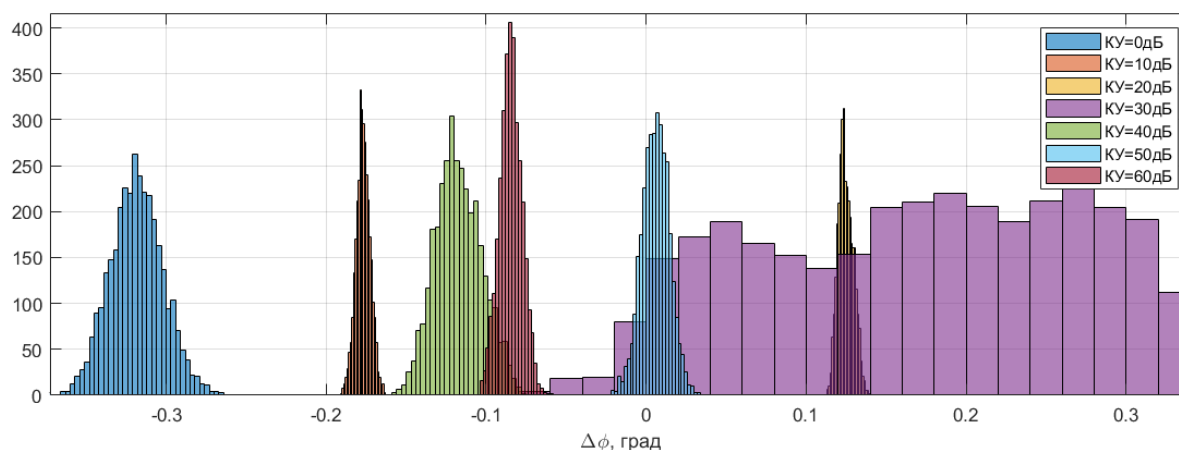
3) В следующих сериях измерений использовался программный приемник BladeRF в режиме синхронизации приемных каналов от внутреннего опорного генератора. Измерения проводились при различных коэффициентах усиления на интервале времени 140 с (рис. 5). Эксперимент показал, что разброс оценок разности фаз различных записей составляет около  $0,5^\circ$ , при этом СКО измерений каждой записи составляет от  $0,02^\circ$  до  $0,007^\circ$  (таб. 3). В оценках



фазы не наблюдается значительного дрейфа значений, который мог бы влиять на погрешность измерений. Искажение графика разности фаз для КУ 30 дБ вероятнее всего вызвано ошибками работы усилителя для данного КУ.



а



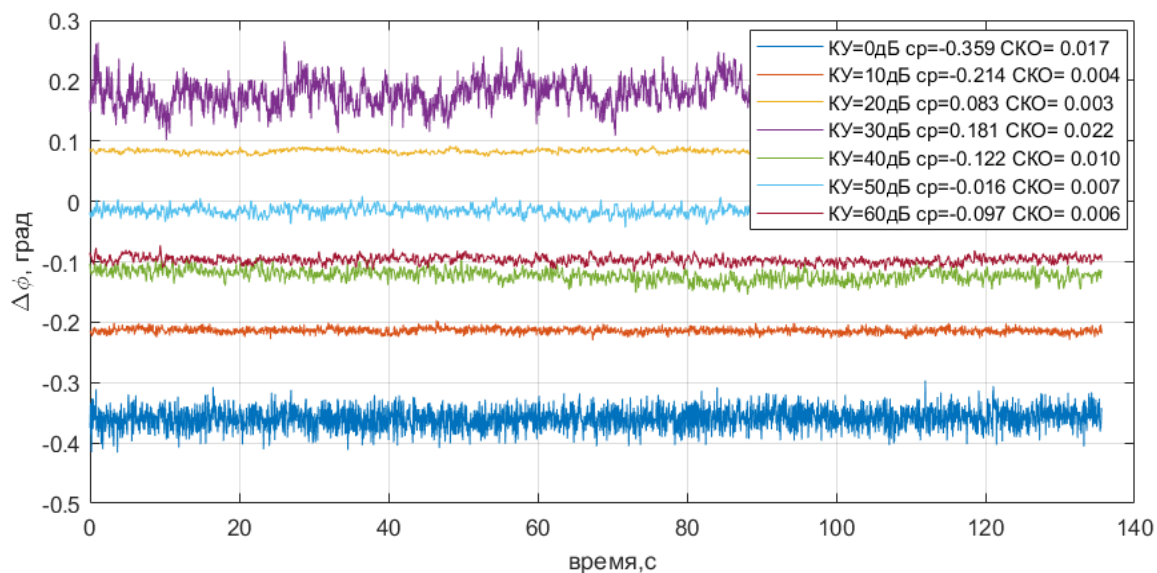
б

Рис. 5. а) Измерения разности фаз при различных КУ BladeRF  
б) гистограммы распределения разности фаз при различных КУ BladeRF.

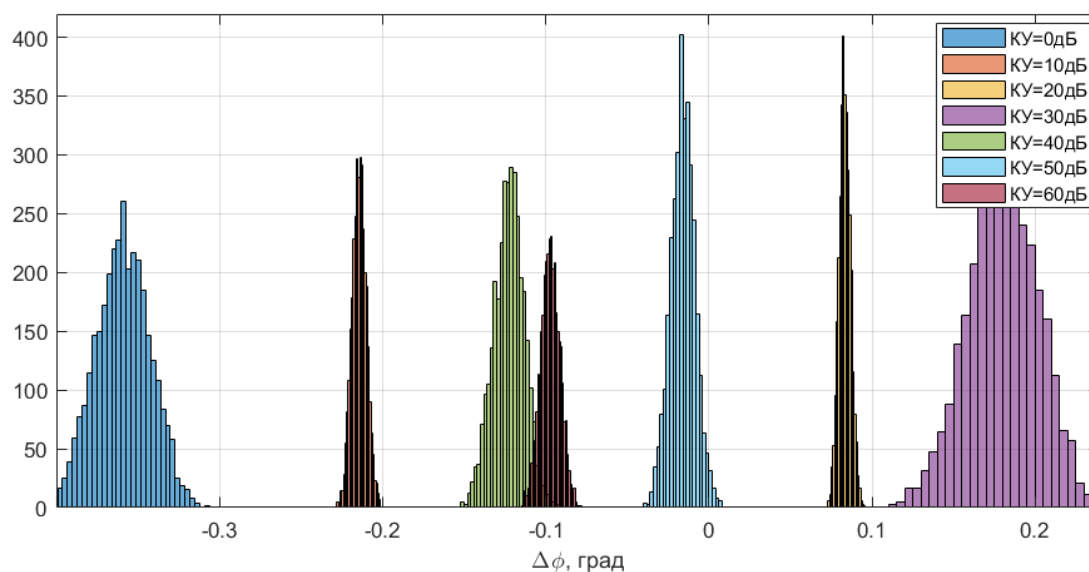
Таблица 3. Результаты оценки  $\Delta\varphi$  SDR BladeRF с внутренним ОГ.

| Коэффициент усиления, дБ | Среднее значение $\Delta\varphi$ , град | СКО $\Delta\varphi$ , град |
|--------------------------|---|----------------------------|
| 0                        | -0,318                                  | 0,017                      |
| 10                       | -0,177                                  | 0,004                      |
| 20                       | 0,125                                   | 0,005                      |
| 30                       | 0,173                                   | 0,104                      |
| 40                       | -0,117                                  | 0,014                      |
| 50                       | 0,006                                   | 0,09                       |
| 60                       | -0,085                                  | 0,007                      |

4) В качестве программного приемника использовался BladeRF в режиме синхронизации приемных каналов от внешнего высокостабильного ОГ. Измерения проводились при различных коэффициентах усиления (КУ) BladeRF на интервале времени 140 с (рис. 6, таб. 4).



а



б

Рис. 6. а) Измерения разности фаз при различных КУ BladeRF  
б) гистограммы распределения разности фаз при различных КУ BladeRF.

Таблица 3. Результаты оценки  $\Delta\varphi$  SDR BladeRF с внутренним ОГ.

| Коэффициент усиления, дБ | Среднее значение $\Delta\varphi$ , град | СКО $\Delta\varphi$ , град |
|--------------------------|---|----------------------------|
| 0                        | -0,359                                  | 0,017                      |
| 10                       | -0,214                                  | 0,004                      |
| 20                       | 0,083                                   | 0,003                      |
| 30                       | 0,181                                   | 0,022                      |
| 40                       | -0,122                                  | 0,010                      |
| 50                       | -0,016                                  | 0,007                      |
| 60                       | -0,097                                  | 0,006                      |

Таким образом, эксперименты 3 и 4 показывают, что при работе BladeRF с синхронизацией каналов как от внутреннего ОГ, так и от внешнего высокостабильного ОГ наблюдаются одинаковые для двух экспериментов систематические приращения при изменении коэффициента усиления данного программного приемника. СКО при синхронизации от внутреннего и внешнего ОГ практически одинаковые. При длительных интервалах измерения (рис. 7) разности фаз SDR BladeRF с внешним и внутренним ОГ СКО измерений отличаются в 2 раз.

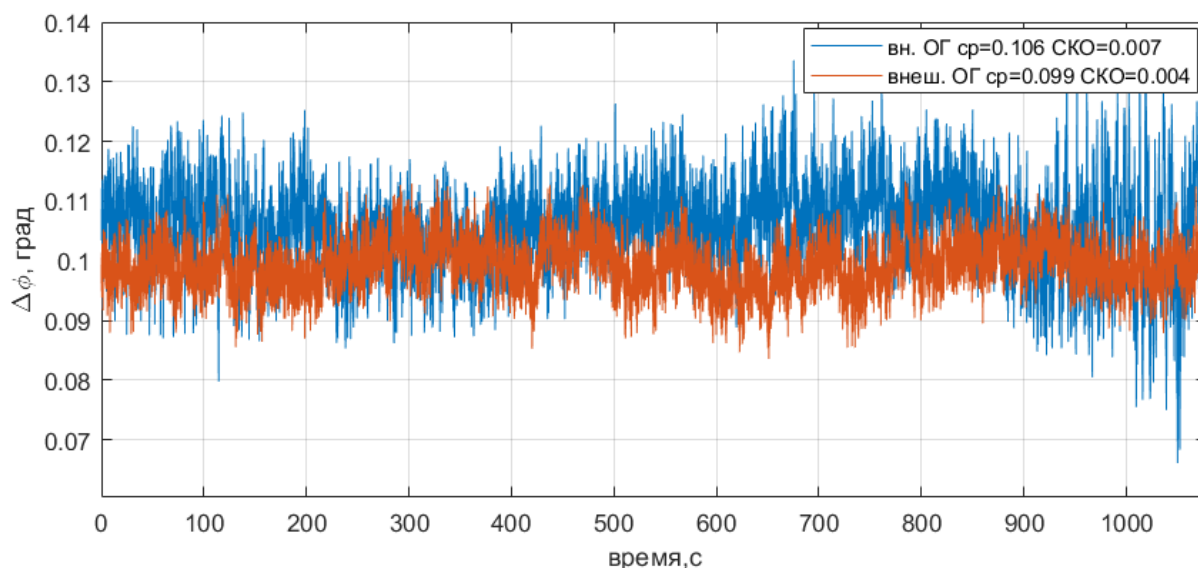


Рис. 7. Измерения разности фаз интервале 1100 с.

## Заключение

Использование программного приемника для создания БРЛС на сигналах ГНСС позволит принимать и обрабатывать существующие и будущие сигналы от всех группировок ГНСС.

Проведенные эксперименты показали стабильность разности фаз между каналами как при перезапуске, так и при различном времени измерений. При изменении коэффициента усиления программного приемника наблюдается систематические приращения разности фаз, которые в дальнейшем возможно учесть при проведении калибровки.

Для USRP X310 наблюдается улучшение СКО измерений при использовании внешнего высокостабильного опорного генератора. Для программного приемника BladeRF наблюдается незначительное улучшение СКО измерений разности фаз при использовании внешнего опорного генератора.

Полученная стабильность разности фаз двух входных сигналов позволяет минимизировать инструментальную погрешность при измерении высоты геоида фазовым методом с помощью БРЛС на сигналах ГНСС.

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-67-10007, <https://rscf.ru/project/23-67-10007/>.

## Литература

1. Mashburn J. et al. Global ocean altimetry with GNSS reflections from TechDemoSat-1 //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2018. – Т. 56. – №. 7. – p. 4088-4097.
2. Yan Q., Huang W., Foti G. Quantification of the relationship between sea surface roughness and the size of the glistening zone for GNSS-R //IEEE geoscience and remote sensing letters. – 2017. – Т. 15. – №. 2. – p. 237-241.

3. Munoz-Martin J. F. et al. Soil moisture estimation synergy using GNSS-R and L-Band microwave radiometry data from FSSCat/FMPL-2 //Remote Sensing. – 2021. – Т. 13. – №. 5. – p. 994.
4. Yan Q., Huang W. Sea ice remote sensing using GNSS-R: A review //Remote Sensing. – 2019. – Т. 11. – №. 21. – p. 2565.
5. Ribot M. A. et al. Normalized GNSS interference pattern technique for altimetry //Sensors. – 2014. – Т. 14. – №. 6. – p. 10234-10257.
6. Carreno-Luengo H. et al. Experimental evaluation of GNSS-reflectometry altimetric precision using the P (Y) and C/A signals //IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2014. – Т. 7. – №.5. – p. 1493-1500.
7. Roesler C. J., Morton Y. J., Nerem R. S. Gulf of Mexico loop-current signature observed from GNSS-R phase altimetry based on spire global CubeSat data //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2023. –Т. 61.–p. 1-14.
8. Camps A. et al. GNSS-R altimetry performance analysis for the GEROS experiment on board the international space station //Sensors. – 2017. – Т. 17. – №. 7. – p. 1583.
9. Zhang Y., Zheng W., Liu Z. Improving the spaceborne GNSS-R altimetric precision based on the novel multilayer feedforward neural network weighted joint prediction model //Defence Technology. – 2024. – Т. 32. – p. 271-284.
10. ZHANG Y. et al. Sea surface height inversion of GPS reflected signal based on TechDemoSat-1 satellite. – 2021. – Т. 47. – №. 10. – p. 1941-1948.
11. Li W. et al. The impact of inter-modulation components on interferometric GNSS-reflectometry //Remote Sensing. – 2016. – Т. 8. – №. 12. – p. 1013.
12. Nguyen V. A. et al. Initial GNSS phase altimetry measurements from the spire satellite constellation //Geophysical Research Letters. – 2020. – Т. 47. – №. 15. – C. e2020GL088308.

13. Лопатин В.П., Мурзабеков М.М., Бобров Д.С., Результаты определения профиля высот геоида и уклонения отвесной линии по сигналам ГНСС, отраженным от водной поверхности // Геодезия и картография. – 2024. – № 2. – С. 21-30. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2024-1004-2-21-30>
14. Signalet-Cazalet F. et al. SARAL/AltiKa products handbook //CNES and ISRO, Toulouse, France, Tech. Rep. sALP-MU-M-OP-15984-CN. – 2021.
15. Лопатин В. П., Мурзабеков М. М., Бобров Д. С. Метод определения высот геоида с помощью бортовой бистатической системы наноспутника на основе сигналов ГНСС //Альманах современной метрологии. – 2023 – №. 4(36). – С. 44-57.
16. Cheng Z. et al. Evaluation of spaceborne GNSS-R based sea surface altimetry using multiple constellation signals //Frontiers in Earth Science. – 2023. – Т. 10. – р. 1079255.

**Для цитирования:**

Фатеев В.Ф., Ксендзук А.В., Лопатин В.П., Артющев Д.А. Оценка стабильности измерения разности фаз в пассивной бистатической системе ГНСС-радиолокации на базе программного приемника. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.24>