

## **ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ГНСС-РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ ДО ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

*Антон Игоревич Сипко*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант, тел. (913)925-45-46, e-mail: sipkoantonz@gmail.com

*Николай Сергеевич Косарев*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (913)706-91-95, e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

В статье уделено внимание перспективному методу ГНСС-рефлектометрии, который в настоящее время используется для решения целого комплекса задач, возникающих в океанологии, климатологии, гидрографии, геофизике, гляциологии, гидрометрии и ряде других смежных наук о Земле. Показано, что точность метода ГНСС-рефлектометрии с использованием одного приемника оценивается в несколько сантиметров и зависит от отражающей поверхности. По предварительным результатам, проведенным авторами, точность метода ГНСС-рефлектометрии с использованием одного приемника находится в пределах нескольких сантиметров и зависит не только от отражающей поверхности, но и от выбора спутников для анализа. Для исключения ошибочных результатов по определению высоты до отражающей поверхности предлагается анализировать большее количество спутников, находящихся на высотах от 5 до 25 градусов.

**Ключевые слова:** ГНСС-рефлектометрия, метод SNR, отражающая поверхность.

## **PRELIMINARY RESULTS OF USING GNSS-REFLECTOMETRY METHOD FOR DETERMINING THE HEIGHT TO THE REFLECTING SURFACE**

*Anton I. Sipko*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, graduate student, phone: (913)925-45-46, e-mail: sipkoantonz@gmail.com

*Nikolay S. Kosarev*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Assoc. Prof., Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (913)706-91-95, e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

The article deals with a promising method of GNSS-reflectometry which is currently used to solve a range of different problems in oceanology, climatology, hydrography, geophysics, glaciology, hydrometry, and many other related Earth sciences. It is shown that the accuracy of the GNSS-reflectometry method using only one receiver is estimated to be several centimetres and depends on reflecting surfaces. According to preliminary results, the accuracy of the GNSS-reflectometry method using a single receiver lies within a few centimetres and depends not only on reflecting surfaces, but also on the choice of a satellite to analyse. To eliminate any erroneous results in determining the distance to the reflecting surface, it is suggested to analyse a larger number of satellites located at elevation from 5 to 25 degrees.

**Key words:** GNSS-reflectometry, SNR method, reflecting surface.

## *Введение*

Исследования, направленные на изучение колебаний уровня Мирового океана и внутренних водоемов, позволяют решать целый комплекс задач, возникающих в океанологии, климатологии, гидрографии, геофизике, гляциологии, гидрометрии и ряде других смежных наук о Земле [1–3]. В настоящее время для определения уровенной поверхности Мирового океана и внутренних водоемов, в основном, используется два метода. Первый метод основан на применении различных видов мареографов, другим методом является метод спутниковой альтиметрии, который из-за своих особенностей не может быть применен в прибрежной зоне и в пределах внутренних водоемов.

В последнее время активно ведутся исследования по применению метода ГНСС-рефлектометрии для определения уровня Мирового океана [4,5], но при этом вопрос, связанный с использованием данного метода для определения колебаний уровня внутренних водоемов, все еще остается открытым и требует решения [6]. Поэтому авторы настоящей статьи поставили себе следующую цель: оценить возможность применения метода ГНСС-рефлектометрии для определения колебаний уровня внутренних водоемов.

Из-за климатических особенностей нашей страны достичь поставленную цель исследования в зимний период не представляется возможным, поэтому авторами была выполнена предварительная апробация метода для определения высоты до отражающей поверхности, в качестве которой выступал снежный покров.

## *Методы и материалы*

В статье рассматривается метод ГНСС-рефлектометрии, в котором используется один спутниковый приемник (рис. 1).

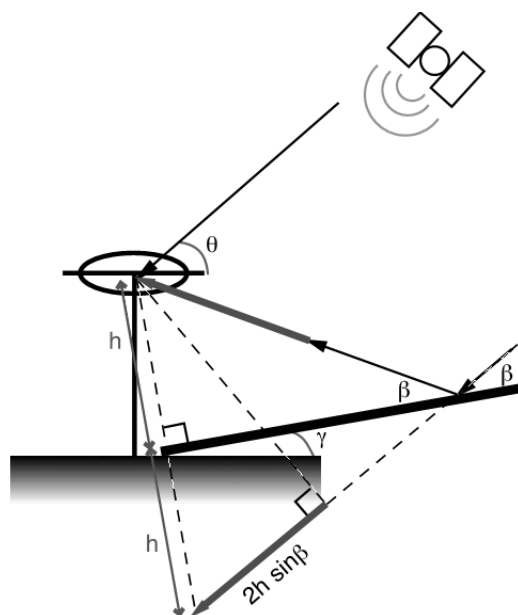


Рис. 1. Схема метода ГНСС-рефлектометрии с использованием одного приемника

В соответствии с концепцией многолучевого распространения длина дополнительного пути ( $\delta$ ) может быть записана как функция, зависящая от высоты отражателя ( $h$ ) и угла падения ( $\beta$ ) [7]

$$\delta = 2 \cdot h \cdot \sin \beta. \quad (1)$$

Умножив правую часть уравнения (1) на величину  $\frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$ , получим

$$\psi = \Delta\varphi = \frac{4 \cdot \pi \cdot h \cdot \sin \beta}{\lambda} = \frac{4 \cdot \pi \cdot h \cdot \sin(|\theta - \gamma|)}{\lambda}, \quad (2)$$

где  $\theta$  – маска по высоте,  $\gamma$  – угол наклона плоской отражающей поверхности,  $\psi$  – фазовая задержка.

Так как угол  $\gamma$  – мал, то формула (2) принимает вид

$$\psi = \Delta\varphi = \frac{4 \cdot \pi \cdot h \cdot \sin(\theta)}{\lambda}. \quad (3)$$

Связь между отношением сигнал-шум (SNR) и маской по высоте ( $\theta$ ) определяется следующим выражением

$$SNR^2 = A_d^2 + A_{mp}^2 + 2 \cdot A_d \cdot A_{mp} \cdot \cos(\psi), \quad (4)$$

где  $A_d$  – амплитуда многолучевого распространения сигнала,  $A_{mp}$  – амплитуда прямого сигнала.

Учитывая, что  $A_{mp} < A_d$ , а также после сглаживания временного ряда значений SNR полиномиальной моделью низкого порядка, уравнение (4) можно представить в следующем формализованном виде [8]

$$SNR \sim A \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot h \cdot \sin(\theta)}{\lambda} + \varphi_0\right), \quad (5)$$

где  $\varphi_0$  – фазовый сдвиг.

Таким образом, при анализе значений SNR можно определить высоту фазового центра антенны над любой отражающей поверхностью.

Представленный алгоритм определения высоты над любой отражающей поверхностью был реализован в программном продукте GNSS reflectometry, разработанном в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова [9].

Структурно программный продукт состоит из нескольких модулей:

– *модуль управления* – модуль, отвечающий за загрузку измерений, точных эфемерид и параметров обработки. Этот модуль анализирует исходные данные и передает информацию в вычислительный центр;

– *вычислительный центр* – модуль, принимающий на входе такие исходные данные как:

наблюдения (\*.obs);

точные эфемериды (\*.sp3);

маска возвышения спутников, участвующих в обработке;

маска по азимуту восхождения спутника.

Структура программы в виде схемы представлена на рис. 2.

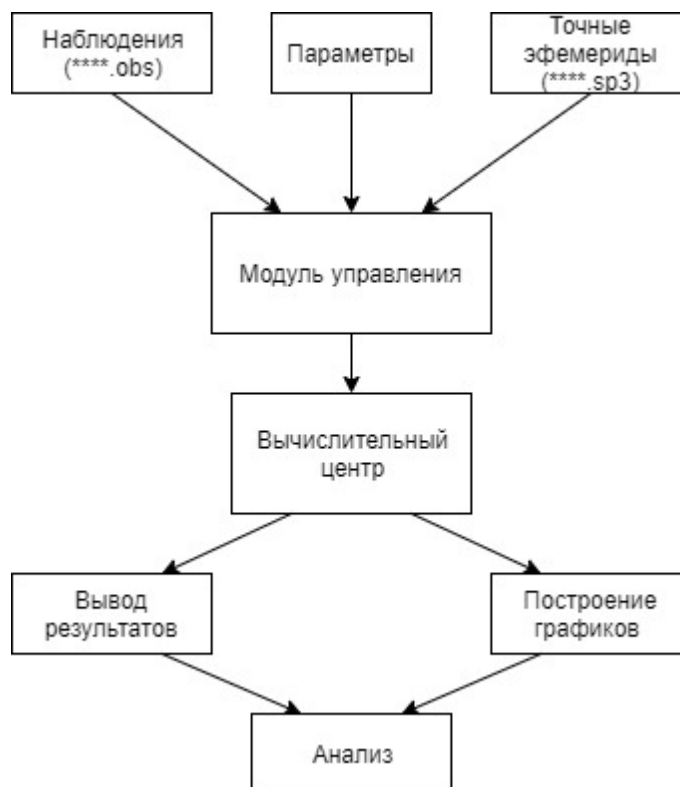


Рис. 2. Структура программного продукта GNSS reflectometry

Для реализации представленного алгоритма из файла наблюдений (формат RINEX) выбирается следующая информация:

- время начала и конца наблюдений;
- приближенные координаты станции наблюдений;
- SNR измеряемые приемников для фазовых измерений.

Поскольку алгоритм анализирует переотраженные сигналы, то важной характеристикой в программном продукте являются ограничивающие маски. Наибольшую ценность представляют те спутники, которые находятся на высоте от 5 до 25°. Кроме маски по высоте в программном продукте необходимо задать и азимутальные маски, чтобы в обработку не поступили переотражения от зданий, рекламных щитов, береговой линии и т.д.

Точность метода ГНСС-рефлетометрии с использованием одного приемника оценивается в несколько сантиметров и зависит от отражающей поверхности [10].

## *Результаты исследований*

Для достижения поставленной цели авторами было проведено два эксперимента. Суть первого эксперимента заключалась в следующем. В открытом поле на штативе устанавливался ГНСС-приемник Javad Triumph 2. С помощью контроллера приемник был запущен в режиме статика со следующими настройками: дискретность записи измерений 1 секунда, маска по высоте  $0^\circ$ . Высота инструмента измерялась рулеткой до отражающей поверхности снега и составила 55 см. Спустя час измерений высота инструмента была изменена на 10 см и составила 65 см. После этого в течение часа велась запись измерений при измененной высоте инструмента.

Далее измерения были обработаны в программном продукте GNSS reflectometry при следующих настройках: маска по высоте для спутников была установлена от 5 до  $25^\circ$ , маска по азимуту не накладывалась.

Вычисленные значения высоты приемника до поверхности снега по измерениям составили 58 см до изменения высоты и 67 см после изменения. Значения высоты определенные с помощью ГНСС-рефлектометрии и измерительной рулетки различаются на 2-3 см, что соответствует ожидаемой точности.

Эти предварительные результаты показали, что исследуемый алгоритм работает корректно и может быть применен для более продолжительного по времени эксперимента.

*Второй эксперимент* выполнялся приемником Stonex S900, по аналогичной схеме, за исключением того что высота приемника менялась с помощью специального переходника-удлинителя, размером 30 см. Переходник применялся для точного изменения высоты прибора. Каждый час после начала измерений изменялась высота приемника, общая продолжительность наблюдений составила 14 часов.

При обработке измерений в программном продукте GNSS reflectometry использовались спутники с азимутом от  $295^\circ$  до  $320^\circ$ , это было необходимо, чтобы уменьшить переотражение сигнала от домов и построек. Маска по высоте устанавливалась от 8 до  $25^\circ$ .

По результатам обработки измерений высота приемника до отражающей поверхности без переходника была определена трижды. По спутнику GPS25 высота составила 0,548 м, по спутнику GPS 0,478 м, по спутнику GPS03 0,620 м. Высота с добавлением переходника была определена лишь один раз, по спутнику GPS11 и составила 0,942 м.

Так же было получено 11 ошибочных значений высоты, это вызвано, прежде всего, тем, что имеется большое количество препятствий, закрывающих радиогоризонт и вносящих шумы в измерения, для коррекции этого применяется маска по высоте и азимуту, для этого необходимо опытным путем подобрать необходимые значения. Если анализировать корректно полученные значения высот до отражающей поверхности, то точность метода так же соответствуют ожидаемой и составляет  $\sim 5$  см.

## Выводы

Проведенные эксперименты позволяют сделать вывод о достаточно хороших результатах по определению высоты до отражающей поверхности.

Анализируя результаты, нельзя не обратить внимание на полученные ошибочные значения расстояния до отражающей поверхности, это говорит о необходимости создания дополнительных фильтров, которые позволят исключать подобные ошибки. Данные фильтры могут быть созданы на основе физических характеристик отражающей поверхности. Кроме этого можно использовать большее число спутниковых систем для получения более корректной оценки высоты до отражающей поверхности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование современных глобальных моделей гравитационного поля Земли : монография / В. Ф. Канушин и др. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 270 с.
2. Hydrographic Surveying [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://c.ymcdn.com/sites/www.njspls.org/resource/resmgr/imported/Hydrographic\\_Surveying\\_PDH%20Farrell-1.pdf](https://c.ymcdn.com/sites/www.njspls.org/resource/resmgr/imported/Hydrographic_Surveying_PDH%20Farrell-1.pdf)
3. Hydrography / C. D. de Jong, G. Lachapelle, S. Skone et al. – 2nd ed. – VSSD, 2006. – 364 p.
4. Rius A., Cardellach E. Reflectometry : Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. / P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck (Eds.). – Cham, Switzerland : Springer International Publishing AG, 2017. – P. 1164–1186.
5. Löfgren J. S., Haas R. Sea level measurements using multi-frequency GPS and GLONASS observations // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. – 2014. – Vol. 50. – P. 1–13.
6. Sun J. Ground-Based GNSS-Reflectometry Sea Level and Lake Ice Thickness Measurements [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gradsch.osu.edu/calendar/events/gnss-reflectometry-based-sea-level-and-lake-ice-thickness-measurements>.
7. Bilich A., Larson K. M., Axelrad P. Modeling GPS phase multipath with SNR: Case study from the Salar de Uyuni, Boliva // J. Geophys. Res. – 2008. – Vol. 113, B04401, doi:10.1029/2007JB005194.
8. Roussel N., Frappart F., Ramillien G., Darrozes J., Baup F., Lestarquit L., Ha M. C. Detection of Soil Moisture Variations Using GPS and GLONASS SNR Data for Elevation Angles Ranging From 2° to 70° // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2016. – Vol.9 (10). – P. 4781–4794.
9. Курбатов Г.А., Падохин А.М., Терешин Н.А. Программа для определения высоты морской поверхности методом ГНСС-рефлектометрии // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018615308, 04.05.2018. Заявка № 2018612430 от 16.03.2018.
10. Косарев Н. С., Антонович К. М., Колмыков Р. А., Черных Д. Ю. Обзор методов ГНСС-рефлектометрии для определения колебаний высот морской топографической поверхности в России и за рубежом // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23., № 3. – С. 46–60.

© А. И. Сипко, Н. С. Косарев, 2020