

ОЦЕНКА ВЫСОТЫ УРОВНЯ МОРЯ ПО ДАННЫМ GNSS-РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Г.А. Курбатов, А.В. Карлышева, А.М. Падохин

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
karlyshevaAnzhela@gmail.com

ESTIMATING SEA LEVEL WITH GNSS-REFLECTOMETRY DATA

G.A. Kurbatov, A.V. Karlysheva, A.M. Padokhin

M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Аннотация. В работе исследуются методы GNSS-рефлектометрии для определения высоты уровня водной поверхности по данным одиночного GNSS приемника основанные на использовании многолучевости, возникающей при отражении навигационных сигналов от водной поверхности. Подобное многолучевое распространение приводит к появлению в данных соотношения сигнал/шум (SNR) для малых углов возвышения спутников GNSS интерференционной картины, параметры которой определяются длиной волны навигационного сигнала и высотой фазового центра антенны над отражающей водной поверхностью. В работе использовались данные SNR S1 и S2 для двух рабочих частот систем GPS и ГЛОНАСС со станции MAYG.

Ключевые слова: GNSS-рефлектометрия.

Abstract. We study GNSS-Reflectometry methods for estimation of sea level height with single station receiver based on the multipath propagation caused by the reflection of the navigational signals from the sea surface. Such multipath propagation at low satellites elevation angles effects in the occurrence of the interferometric pattern in GNSS SNR measurements, which parameters are determined by the signal frequency and the height of the antennas phase-center above the reflecting sea surface. In this work for estimation of the seal level height we used SNR S1 and S2 data for both GPS and GLONASS satellites measured at MAYG station.

Keywords: GNSS-reflectometry.

Введение

Динамика среднего уровня поверхности мирового океана играет значительную роль в развитии прибрежных территорий. Таким образом крайне важно осуществлять мониторинг и оценку изменений уровня мирового океана в глобальном масштабе. Такие измерения традиционно проводятся с использованием сетей мареографов [IOC UNESCO, 2006]. Однако измерения даже самых точных мареографов несут в себе, помимо непосредственно измерений уровня мирового океана, некоторую добавку, вызванную движением земной поверхности. В связи с этим было предложено использовать GNSS-приемники в прибрежных зонах, которые позволяют одновременно оценивать движения земной коры и уровень мирового океана с использованием отраженных навигационных радиосигналов [Löfgren et al., 2011; Belmonte, Martin-Neira, 2006; Larson et al., 2013].

Постановка задачи

Несмотря на то, что основной задачей обычной GNSS антенны с правой круговой поляризацией является прием и усиление прямого сигнала, не вся энергия отраженного от водной поверхности сигнала эффективно подавляется. Это связано с тем, что на углах возвышения спутника менее 10° в отраженном от поверхности океана сигнале присутствует как левая (доминирующая) так и правополяризованная компонента, которая затем быстро убывает с ростом угла возвышения спутника [Hannah, 2001]. Таким образом, на малых углах возвышения спутников GNSS для азимутов обеспечивающих наличие отраженного от поверхности океана сигнала в ампли-

тудных данных GNSS сигналов может наблюдаться интерференционная картина между прямым и отраженным сигналом. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Учитывая, что показатель преломления атмосферы сигналов GNSS мало отличается от 1, для расчета разности фаз прямого и отраженного сигнала можно использовать простую геометрическую разность хода лучей. При отражении от плоской поверхности разность хода между этими лучами составляет $\Delta = 2h \sin \theta$, где θ — угол возвышения спутника, h — высота фазового центра антенны над отражающей поверхностью. Таким образом детрендованные вариации амплитуды или SNR принятого GNSS сигнала на небольших углах возвышения спутника за счет многолучевости можно представить в виде:

$$\text{var SNR} \sim A \sin \left(\frac{4\pi h \sin \theta}{\lambda} + \varphi_0 \right), \quad (1)$$

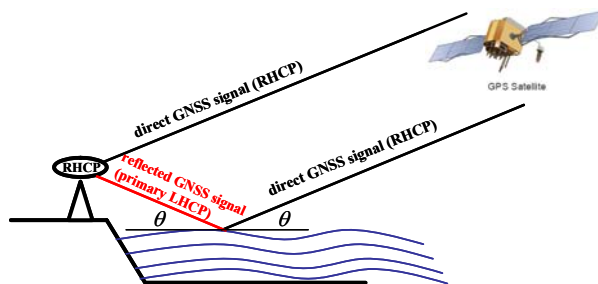


Рис. 1. Геометрия эксперимента по определению высоты уровня водной поверхности по данным GNSS-рефлектометрии

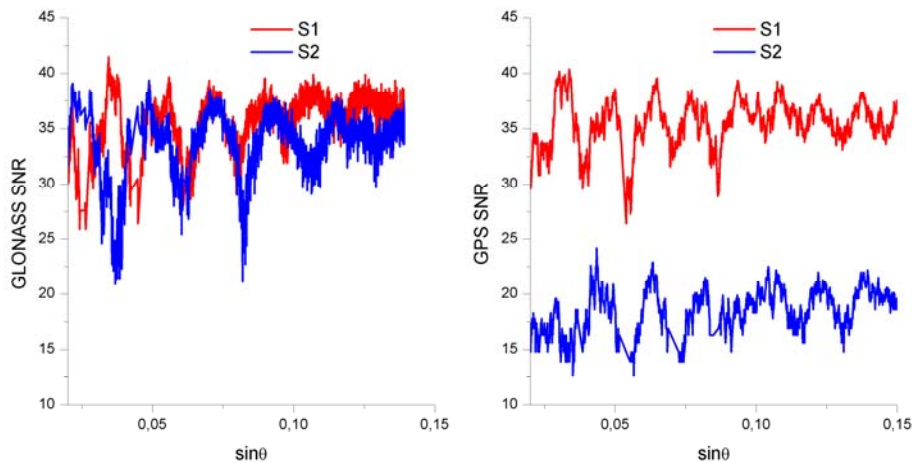


Рис. 2. SNR S1 и S2 для пролетов спутников ГЛОНАСС R16 и GPS G15 по данным станции MAYG, 31 января 2016 г.

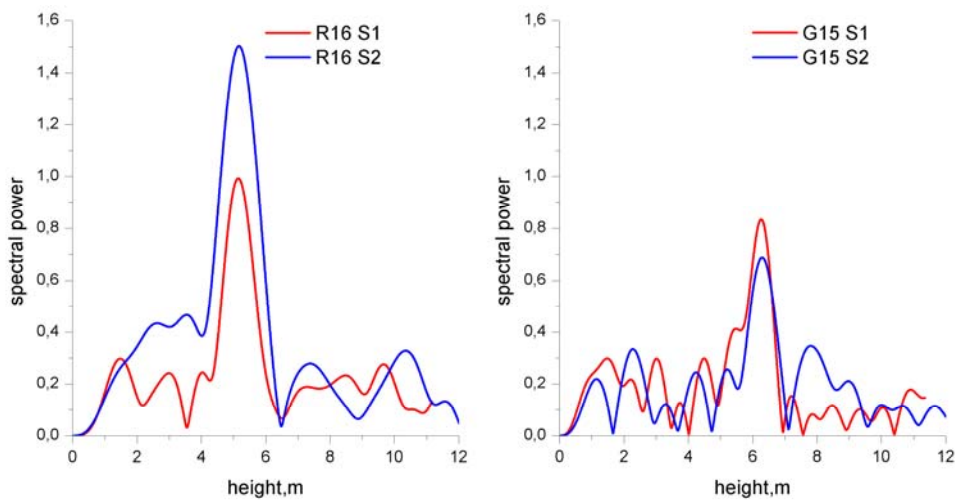


Рис. 3. Спектры вариаций S1 и S2 для пролетов спутников ГЛОНАСС R16 и GPS G15 по данным станции MAYG, 31 января 2016 г.

где A — амплитуда колебаний, медленно меняющаяся в зависимости от угла возвышения спутника, λ — длина волны GNSS сигнала, φ_0 — некоторый фазовый сдвиг. Таким образом в экспериментальных зависимостях $\text{varSNR}(\sin\theta)$ должны наблюдаться колебания с постоянной частотой $\frac{2h}{\lambda}$, которая может быть определена при анализе спектра вариаций амплитуды сигнала или SNR, что позволяет при известной длине волны GNSS сигнала определить высоту фазового центра антенны над водной поверхностью. Отметим, что для получения данной интерференционной картины необходима запись SNR длительностью ~ 25 мин, столько времени необходимо спутнику GNSS для прохождения диапазона углов возвышения $3\dots 15^\circ$. Любые изменения уровня поверхности на данном временном интервале будут усреднены, при этом подобные колебания приведут к уширению основной линии в спектре интерференционной картины, а также появлению дополнительных гармоник меньшей интенсивности, которые будут играть роль шума при выделении основной периодики. Для выделения основной гармоники в настоящей работе использовался критерий превы-

шения в два раза среднего значения амплитуды шума в спектре.

Экспериментальные данные и анализ полученных результатов

Для анализа использовались данные GNSS станции MAYG (12.78 S, 45.26 E) сети IGS-MGEX. Этот пункт оснащен приемником Trimble Net-R9 с антенной Trimble Choke-Ring, данные находящиеся в открытом доступе содержат SNR S1 и S2 для двух рабочих частот GPS и ГЛОНАСС, а также COMPASS/BeiDou, частота предоставления данных составляет 1Гц. Выбранные азимутальные направления $20\dots 80$ и $110\dots 170^\circ$ обеспечивают наблюдения интерференционной картины в принимаемом сигнале за счет отражения от водной поверхности в диапазоне углов возвышения спутников $3\dots 15^\circ$. Для определения уровня поверхности океана использовались спутники как GPS, так и ГЛОНАСС, что позволяет практически удвоить количество измерений в сутки (в среднем 12 измерений по данным GPS, 8 — по данным ГЛОНАСС). Более того, использовались данные для обеих рабочих частот, что позволяет не только удвоить число определений высоты для каж-

дого конкретного спутника, но также выбрать оптимальную с точки зрения соотношения сигнал-шум в спектре оценку высоты. В дальнейшем возможно также использовать данные COMPASS/BeiDou.

В качестве примера на рис. 2 представлены записи SNR S1 (красные кривые) и S2 (синие кривые) в зависимости от синуса угла возвышения спутника для пролетов спутников ГЛОНАСС R16 (слева) и GPS G15 (справа) для 31 января 2016 г. Отметим, что в вариациях S1 и S2 хорошо прослеживаются периодичности обусловленные многолучевостью, вызванной отражением от водной поверхности. Отметим сопоставимые значения SNR для обеих рабочих частот ГЛОНАСС, в случае с GPS SNR для первой частоты практически вдвое превышает SNR для второй частоты, за счет большей мощности передатчика.

На рис. 3 представлены спектры вариаций S1 (красные кривые) и S2 (синие кривые) для тех же спутников (R16 — слева, G15 — справа). Частоты в спектре пересчитаны в высоту антенны над отражающей поверхностью. Видно, что оценки высоты полученные в разное время отличаются больше чем на 1 м за счет приливных эффектов. Отметим также существенное превышение значений амплитуды основной гармоники над уровнем шума для обеих рабочих частот, причем амплитуды основной гармоники выше для второй рабочей частоты для спутника ГЛОНАСС R16 и сопоставимы для спутника GPS G15.

Отметим, что на точность определения высоты влияет амплитуда вариаций S1 и S2, иными словами — число максимумов и минимумов интерференционной картины, которое можно различить на фоне шума. Учитывая тот факт, что интенсивность принятого отраженного сигнала падает с ростом угла возвышения спутника (эффект диаграммы направленности антенны), разумным для задач GNSS-рефлектометрии представляется ориентация приемной антенны не в зенит, а горизонтально в направлении водной поверхности, как это предложено в [Santamaría-Gómez, Watson, 2017], что позволяет существенно увеличить число наблюдаемых экстремумов интерференционной картины.

Заключение

В работе рассмотрен метод определения высоты уровня водной поверхности по данным GNSS-рефлектометрии с использованием одновременно двух рабочих частот систем GPS и ГЛОНАСС. Хотя GNSS-рефлектометрия не может в полной мере заменить измерения уровня поверхности океана с помощью мареографов, но позволяет получить дополнительную полезную информацию в случае наличия достаточного количества GNSS приемников в береговых зонах.

Авторы благодарны IGS-MGEX за данные использованные в работе.

Список литературы

- Belmonte R., Martin-Neira M. Coherent GPS reflections from the sea surface // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 2006. V. 3. P. 28–31.
- Hannah B.M. Modelling and simulation of GPS multipath propagation: Ph.D. Thesis. Queensland University of Technology, Brisbane, Australia, 2001.
- IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission) of UNESCO. Manual on sea level measurement and interpretation, IV: An update to 2006, IOC manuals and guides. JCOMM Technical Report No.31, WMO/TD. No.1339, 78 p., Paris, 2006.
- Larson K.M., Löfgren J.S., Haas R. Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver // *Adv. Space Res.* 2013. V. 51(8). P. 1301–1310. DOI: 10.1016/j.asr.2012.04.017.
- Löfgren J.S., Haas R., Johansson J.M. Monitoring coastal sea level using reflected GNSS signals // *Adv. Space Res.* 2011. V. 47 (2). P. 213–220.
- Santamaría-Gómez A., Watson C. Remote leveling of tide gauges using GNSS reflectometry: case study at Spring Bay, Australia, *GPS Solutions*, 21: 2017. 451, DOI: 10.1007/s10291-016-0537-x/