

## КОСМИЧЕСКИЙ БИСТАТИЧЕСКИЙ РАДИОЛОКАТОР КОНТРОЛЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА НА ОСНОВЕ СИГНАЛОВ ГНСС

В. Ф. ФАТЕЕВ, В. П. ЛОПАТИН

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,  
141570, Менделеево, Московская обл., Россия  
E-mail: fateev@vniiftri.ru*

Представлен пассивный космический бистатический радиолокатор, размещаемый на борту МКА, для измерения профиля поверхности океана с использованием сигналов ГНСС. Система может быть использована для контроля уровня и характеристик взволнованности водной поверхности. Приведены результаты моделирования и экспериментов при различной высоте размещения бистатического радиолокатора.

**Ключевые слова:** малоразмерный космический аппарат, глобальные навигационные спутниковые системы, бистатическая ГНСС-радиолокация, альтиметрия

Определение геоида — одна из основных задач геодезии и гравиметрии, а определение уровня Мирового океана представляет интерес для океанологии, поскольку поверхность геоида совпадает с поверхностью Мирового океана в состоянии полного покоя и равновесия (в отсутствие ветровых волн, океанических течений и приливов). В настоящее время измерения высоты уровня моря проводятся в основном с помощью методов активной спутниковой альтиметрии [1]. Эти методы базируются на использовании радиовысотометров (РВ), размещенных на борту специальных спутников геодезического назначения (например, Jason-1,2,3, TOPEX/Poseidon, Envisat, ERS-1,2 и, в том числе, российские спутники типа Гео-ИК); масса таких спутников достигает нескольких тонн.

Современные спутниковые РВ основаны на использовании принципа монолокации, когда излучение и прием зондирующего радиосигнала осуществляются в одной и той же точке пространства на борту космического аппарата (КА). Такой РВ производит измерения высоты только вдоль подспутниковой трассы. Кроме того, он должен иметь достаточно мощный бортовой передатчик и соответствующую мощную систему электропитания.

Эти недостатки можно нивелировать, используя метод многопозиционной бистатической радиолокации с радиоподсветом от спутников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [2—6].

В этом направлении, которое в зарубежной литературе называется ГНСС-рефлектометрией [7, 8], проведен ряд успешных экспериментов как в России [3, 5], так и за рубежом [8]. В настоящее время многоспутниковая система GYGNSS (NASA) используется для контроля метеорологических параметров над поверхностью океана [9].

Принцип работы бистатического ГНСС-радиолокатора контроля профиля поверхности океана на основе сигналов от навигационных спутников поясняется рис. 1.

Навигационные спутники непрерывно излучают сигналы L-диапазона в направлении Земли, часть из которых отражается от поверхности. Прямые сигналы от навигационных спутников принимаются слабонаправленной антенной, направленной в „зенит“, отраженные от водной поверхности сигналы в окрестности точки с зеркальным отражением (угол падения равен углу отражения) принимаются антенной, направленной в „надир“. Чтобы решить задачу определения уровня поверхности океана, необходимо определить разность времени распространения прямого и отраженного сигналов, а также координаты и скорости приемника

и спутника ГНСС. Измерения характеристик отражающей поверхности основаны на зависимости распределения мощности отраженного сигнала от частоты и времени (частотные каналы и временные каналы).

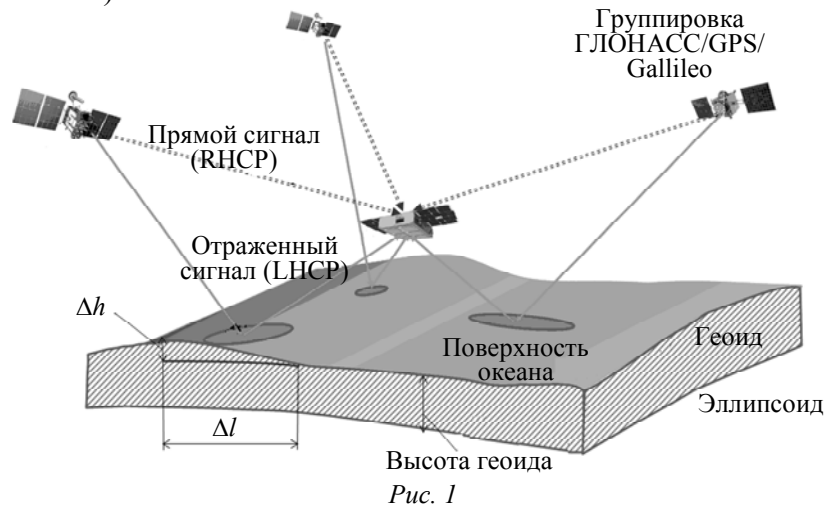


Рис. 1

При использовании классического РВ, базирующегося на принципе монолокации, за один проход КА-носителя наблюдается единственный трек профиля высоты. В бистатическом радиолокаторе на основе приема сигналов ГНСС количество наблюдаемых треков может быть равно количеству видимых навигационных спутников. Поэтому для бистатической радиолокации могут одновременно использоваться до 30—40 навигационных спутников различных ГНСС (ГЛОНАСС/GPS/Galileo/BeiDou и др.). Потребляемая мощность бистатического бортового ГНСС-радиолокатора не превышает 50 Вт.

Предлагаемый бистатический ГНСС-радиолокатор позволяет решать следующие задачи:

- измерение высоты геоида над акваторией Мирового океана; задача решается на основе приема отраженных от водной поверхности океана сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS/Galileo/BeiDou;

- контроль уровня волнения моря (определение характеристик взволнованной поверхности и скорости приповерхностного ветра); решение задачи основано на зависимости мощности отраженных от водной поверхности сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS/Galileo от состояния водной поверхности.

Предлагаемый бистатический ГНСС-радиолокатор имеет следующие преимущества:

- большое количество одновременно принимаемых сигналов от поверхности океана (по количеству навигационных спутников „радиоподсвета“) и соответственно большое количество наблюдаемых треков, что обеспечивает высокую точность измерения уровня воды, характеристик волнения и высокую оперативность измерений;

- небольшой вес бортовой аппаратуры, а также малая потребляемая мощность;

- малые размеры антенной системы;

- возможность определения характеристик взволнованной водной поверхности в любое время суток независимо от сезона.

Для расчета принимаемой мощности отраженного сигнала и измерения высоты отражающей поверхности относительно эллипсоида была разработана, в соответствии с результатами известных исследований [10, 11], имитационная модель, применение которой позволяет выполнять следующие основные задачи:

- расчет координат точки с зеркальным отражением;

- моделирование работы приемного устройства;

- моделирование отражающей поверхности;

- моделирование процесса обработки измерений.

Мощность отраженного сигнала описывается следующим выражением:

$$P(t) = c_0 \int_s \frac{G(s)\Lambda^2(t-t_s)\text{sinc}^2(T_I\Delta f(s))}{4\pi R_t^2 R_r^2} \sigma^0(s) ds,$$

где  $G(s)$  — диаграмма направленности приемной антенны;  $\Lambda^2(t-t_s)$  — автокорреляционная функция сигнала ГНСС;  $\sigma^0(s)$  — коэффициент отражения водной поверхности;  $R_t, R_r$  — расстояния от передатчика и приемника до точки с зеркальным отражением;  $T$  — время накопления сигнала;  $\Delta f(s)$  — разность частот сигналов, отраженных от элемента  $s$  поверхности и от точки с зеркальным отражением.

Упрощенная структурная схема модели бистатического ГНСС-радиолокатора представлена на рис. 2.

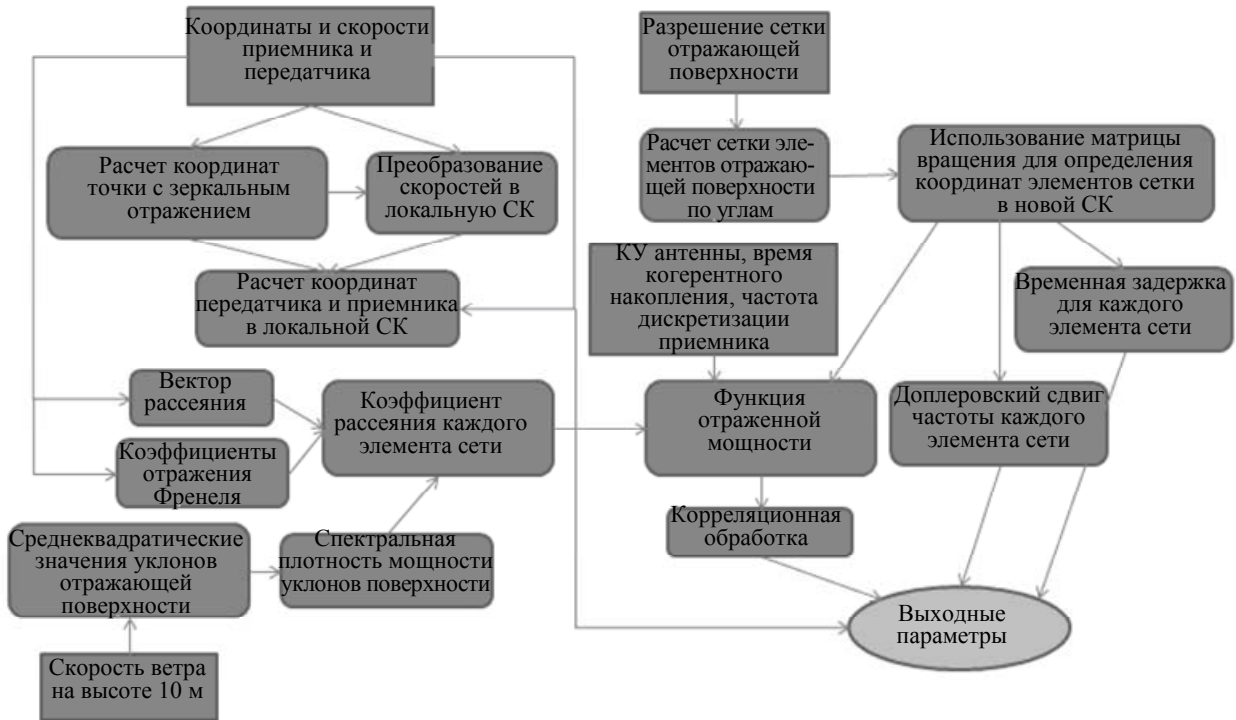


Рис. 2

Работа бистатического радиолокатора промоделирована для случая измерения высоты геоида на основе сигналов ГНСС; входные параметры для моделирования представлены ниже.

Сигнал.....	GPS L1
Высота орбиты, км .....	640
Угол падения/отражения, ... ° .....	72
Учет модели квазигеоида EGM96:.....	Да
Параметры приемного устройства:	
частота дискретизации, МГц.....	10
полоса пропускания фильтра, МГц .....	20
коэффициент шума приемника .....	3
шумовая температура антенны, К.....	150
коэффициент усиления антенны, дБ.....	12
Параметры отражающей поверхности:	
обобщенная диэлектрическая проницаемость	
отражающей водной поверхности .....	75 + i55
скорость ветра на высоте 10 м, м/с.....	6
приращение между доплеровскими каналами, Гц .....	500
длительность моделируемого сигнала, мкс .....	256
время когерентной обработки, с .....	0,001

Форма смоделированной автокорреляционной функции отраженного сигнала показана на рис. 3, где по оси абсцисс отложена задержка сигнала, выраженная через расстояние ( $l$ ). На рис. 4, *a*, *б* представлены зависимости принятой мощности от доплеровского смещения частоты и временной задержки при скорости ветра 6 м/с (*a*) и отсутствии ветра (*б*); видно, что при наличии ветра вместе с зеркальным отражением наблюдается и диффузное.

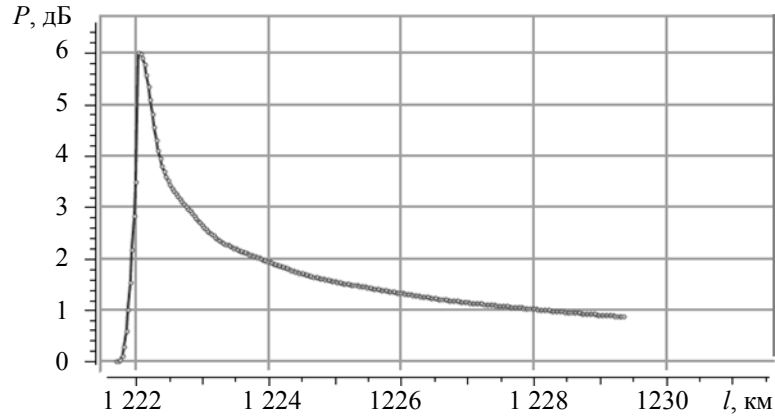


Рис. 3

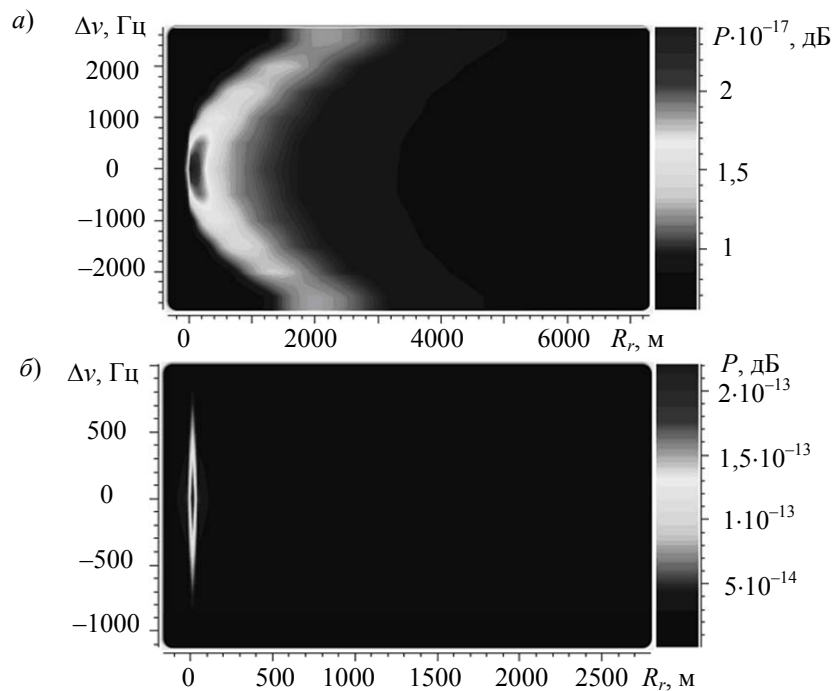


Рис. 4

При моделировании получены результаты, представленные в таблице.

Параметр	Значение
Отношение максимума и минимума формы отраженного сигнала, дБ	6
Вычисленная аномалия высоты геоида в точке с зеркальным отражением, м	-21,67
Истинная высота геоида по модели EGM96, м	-21,135
Мощность отраженного сигнала, Вт	
максимальная	$2,6 \cdot 10^{-17}$ (-166 дБ)
минимальная	$6,3 \cdot 10^{-18}$ (-172 дБ)

Как видно из результатов моделирования, разность вычисленной и истинной (входной) высоты геоида при заданных входных параметрах не превышает 0,6 м.

Моделирование, проведенное в условиях гладкой отражающей поверхности, подтверждает теоретические выводы, что при выполнении критерия Рэля уровень сигнала увеличивается более чем на 30 дБ (см. рис. 4, а) [4].

Во Всероссийском НИИ физико-технических и радиотехнических измерений был проведен ряд экспериментов, направленных на проверку метода бистатической ГНСС-радиолокации при определении высоты размещения приемной аппаратуры. Эксперименты проводились с помощью двух методов бистатической радиолокации.

В первом случае использовались один приемник Javad Quattro-G3D и две антенны: первая антенна с правой круговой поляризацией ориентировалась в „зенит“, а вторая антенна с левой круговой поляризацией ориентировалась в „надир“. Аппаратура размещалась на мосту над Клязьминским водохранилищем (Московская обл.). Схема проведения измерений и положения спутников GPS показана на рис. 5.

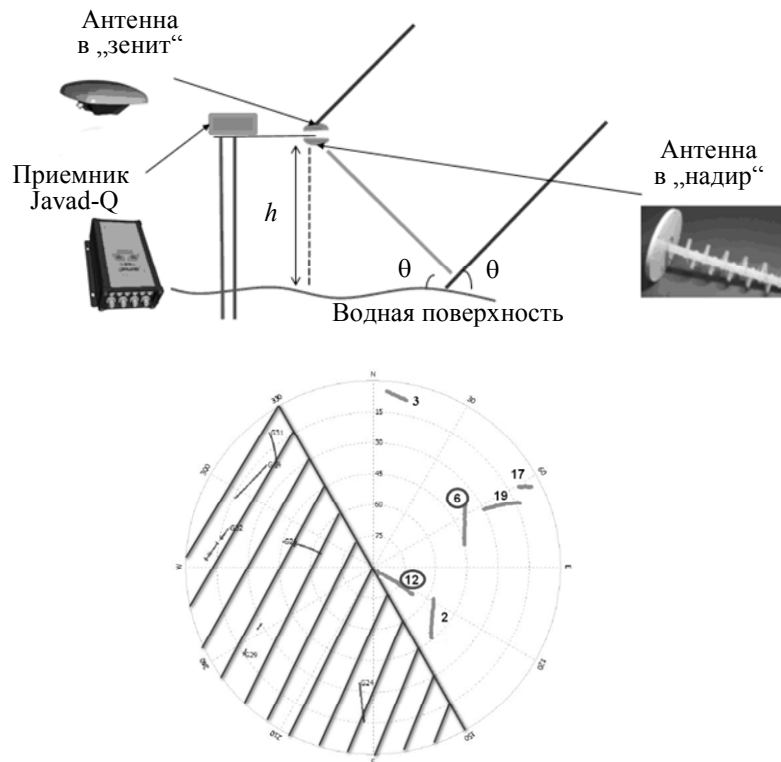


Рис. 5

Высота размещения приемной антенны рассчитывалась по приближенному соотношению

$$h = \frac{R_{\text{отр}} - R_{\text{пр}}}{2 \sin \theta},$$

где  $R_{\text{отр}}$ ,  $R_{\text{пр}}$  — расстояние от передатчика до приемника для отраженного и прямого сигналов,  $\theta$  — угол возвышения спутника.

Результаты измерения высоты по спутникам GPS PRN6 и PRN12 представлены на рис. 6. При расчетах учитывались разность задержек в антенных кабелях на частоте приема, а также расстояние между фазовыми центрами антенн. СКО определения высоты  $\approx 1$  м. Реальная высота до отражающей поверхности составляет 17,1 м.

Во втором случае использовался интерферометрический подход, который реализуется с помощью одной антенны, ориентируемой в „горизонт“ для одновременного приема прямых и отраженных сигналов ГНСС. Схема проведения эксперимента и положения спутников GPS показана на рис. 7.

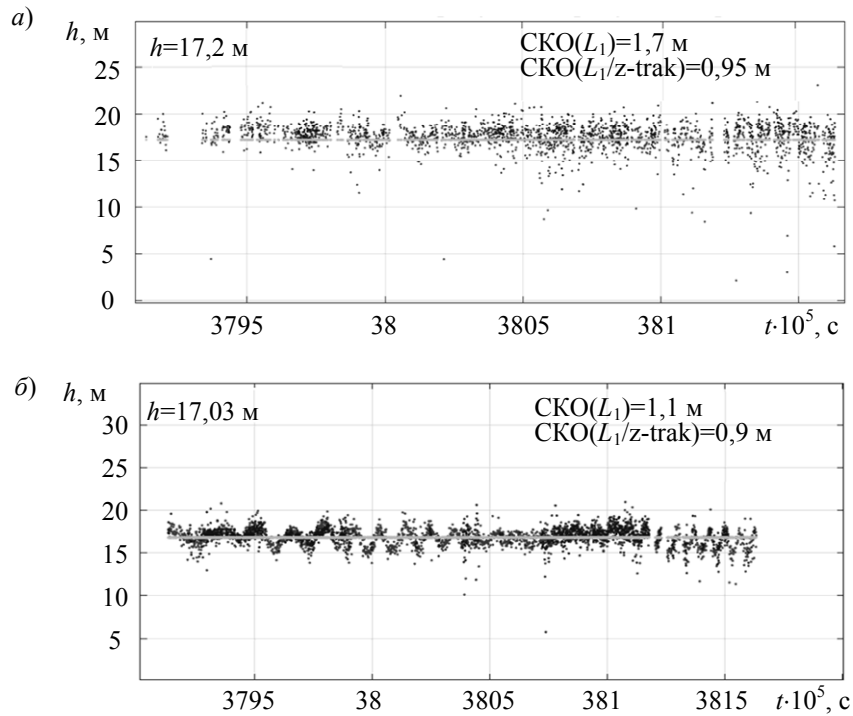


Рис. 6

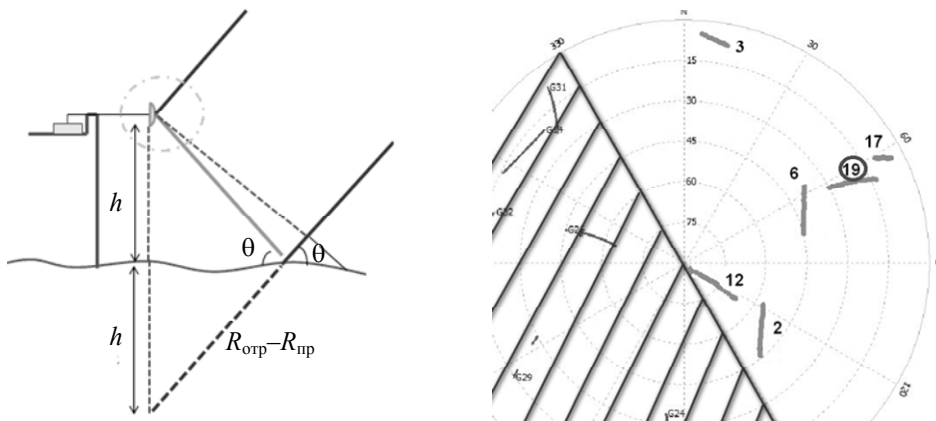


Рис. 7

При использовании интерференционного метода рассматривалось изменение отношения сигнал/шум (SNR) принимаемого сигнала (прямой + отраженный) в зависимости от угла возвышения спутника, длины волны сигнала и высоты размещения приемной антенны. Зависимость значения SNR от высоты размещения антенны имеет следующий вид:

$$SNR \sim A \cos(\varphi_R(t) + \varphi_0) = A \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} h \cos(\theta(t)) + \varphi_0\right),$$

где  $\theta(t)$  — угол возвышения  $i$ -го спутника в момент времени  $t$ ,  $\lambda$  — длина волны сигнала,  $\varphi_0$  — начальная фаза,  $A$  — амплитуда суммарного сигнала.

Результатом измерения сигнал/шума, принимаемого от спутника GPS PRN19, представлены на рис. 8, а, а результаты расчета высоты размещения антенны (спектр колебаний SNR) — на рис. 8, б: вычисленная высота (17,1м) совпадает с реальной высотой размещения антенны до водной поверхности.

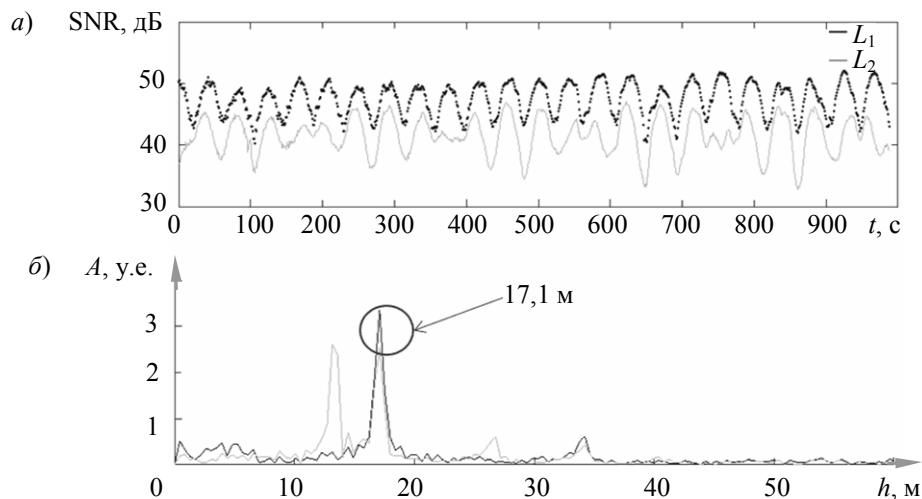


Рис. 8

Таким образом, проведенные эксперименты показывают состоятельность предложенных методов ГНСС-радиолокации для измерения профиля водной поверхности. При космическом базировании бистатического ГНСС-радиолокатора точность определения высоты может достигать 0,1 м.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vignudelli S., Kostianoy A.G., Cipollini P., Benveniste J. Coastal Altimetry. Springer, 2011.
2. Фатеев В. Ф., Сахно И. В. Принцип построения двухпозиционной авиационно-космической РСА с широкополосным непрерывным зондирующим сигналом. Проблемы, методы и алгоритмы испытаний, управление и совершенствование объектов ВКС // Науч.-техн. сб. (труды). 1997. Вып. 4. С. 10—14.
3. Фатеев В. Ф., Ксендзук А. В., Обухов П. С., Крапивкин Г. И., Тимошенко Г. В., Король Г. Н., Новиков В. А., Герасимов П. А., Шахалов К. С. Экспериментальный бистатический радиолокационный комплекс // Радиотехника. 2012. Т. 17, № 5. С. 58—61.
4. Сахно И. В., Ткачев Е. А., Гаврилов Д. А., Успенский К. К. Малый космический аппарат обзора морской поверхности с использованием сигналов спутниковых радионавигационных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 4. С. 34—39.
5. Фатеев В. Ф., Лопатин В. П., Кузьмин Н. И. Методы измерения профиля геоида на поверхности Мирового океана с использованием сигналов ГЛОНАСС, GPS // Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение: Материалы науч.-техн. конф. Менделеево, 2017. С. 110—113.
6. Фатеев В. Ф., Давлатов Р. А., Лопатин В. П. Применение навигационной аппаратуры ГНСС на борту наноспутника // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 5. С. 437—445.
7. Awange J. GNSS Reflectometry and Applications / GNSS Environmental Sensing. Environmental Science and Engineering. Cham, Switz: Springer, 2018.
8. Jin S., Komjathy S. GNSS reflectometry and remote sensing: new objectives and results // Advances in Space Research. 2010. N 46(2). P. 111—117.
9. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cygnss>
10. Zavorotny V. U., Voronovich A. G. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application // IEEE Transact. on Geoscience and Remote Sensing. 2000. N 38. P. 951—964.
11. Gleason S. T., Hodgart S., Yiping S., Gommenginger C. P., Mackin S., Adjrad M., Unwin M. Detection and processing of bistatically reflected GPS signals from low Earth orbit for the purpose of ocean remote sensing // IEEE Transact. on Geoscience and Remote Sensing. 2005. N 43. P. 1229—1241.

## Сведения об авторах

**Вячеслав Филиппович Фатеев** — д-р техн. наук, профессор; Всероссийский НИИ физико-технических и радиотехнических измерений; начальник НТЦ-82; E-mail: fateev@vniiftri.ru

Владислав Павлович Лопатин — Всероссийский НИИ физико-технических и радиотехнических измерений; инженер; E-mail: lopatin@vniiftri.ru

Поступила в редакцию  
07.12.18 г.

**Ссылка для цитирования:** Фатеев В. Ф., Лопатин В. П. Космический бистатический радиолокатор контроля профиля поверхности океана на основе сигналов ГНСС // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 5. С. 484—491.

## SPACE BISTATIC RADAR TO MONITOR THE OCEAN SURFACE PROFILE BASED ON GNSS SIGNALS

V. F. Fateev, V. P. Lopatin

All-Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radio-Technical Measurements,  
141570, Mendeleevo, Moscow region, Russia  
E-mail: fateev@vniiftri.ru

A passive space bistatic GNSS-radar to be mounted on board of small spacecraft, is presented. The radar is designed for measurement of the ocean profile using GNSS signals. The system may be applied to monitor the ocean level and water surface roughness. Results of simulation and experimental studies are presented.

**Keywords:** small spacecraft, global navigation satellite systems, bistatic GNSS-radar, altimetry

### REFERENCES

- Vignudelli S., Kostianoy A.G., Cipollini P., Benveniste J. *Coastal Altimetry*, Springer, 2011.
- Fateev V.F., Sakhno I.V. *Scientific and technical collection (works)*, Issue 4, NIO, 1997, pp. 10–14.
- Fateev V.F., Ksendzuk A.V., Obuhov P.S., Krapivkin G.I., Timoshenko G.V., Korol G.N., Novikov V.A., Gerasimov P.A., Shahalov K.S. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* (Electromagnetic Waves and Electronic Systems), 2012, no. 5(17), pp. 58–61. (in Russ.)
- Sakhno I.V., Tkachev E.A., Gavrilov D.A., Uspenskiy K.K. *Journal of Instrument Engineering*, 2009, no. 4(52), pp. 34–39. (in Russ.)
- Fateev V.F., Lopatin V.P., Kuz'min N.I. *Navigatsiya po gravitatsionnomu polyu Zemli i ee metrologicheskoe obespechenie* (Navigation on Gravitational Field of Earth and Its Metrological Support), Proceedings of the Scientific and Technical Conference, Mendeleevo, Federal State Unitary Enterprise Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radioengineering, 2017, pp. 110–113. (in Russ.)
- Fateev V.F., Davlatov R.A., Lopatin V.P. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 5(61), pp. 437–445. (in Russ.)
- Awange J. *GNSS Reflectometry and Applications / GNSS Environmental Sensing. Environmental Science and Engineering*, Cham, Switz, Springer, 2018.
- Jin S., Komjathy S. *Advances in Space Research*, 2010, no. 6(2), pp. 111–117.
- <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cygnss>.
- Zavorotny V.U., Voronovich A.G. *IEEE Transact. on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, no. 38, pp. 951–964.
- Gleason S.T., Hodgart S., Yiping S., Gommenginger C.P., Mackin S., Adjrard M., Unwin M. *IEEE Transact. on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, no. 43, pp. 1229–1241.

### Data on authors

- Vyacheslav F. Fateev** — Dr. Sci., Professor; All-Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radio-Technical Measurements; Head of the STC-82; E-mail: fateev@vniiftri.ru
- Vladislav P. Lopatin** — All-Russian Scientific Research Institute of Physical-Technical and Radio-Technical Measurements; Engineer; E-mail: lopatin@vniiftri.ru

**For citation:** Fateev V. F., Lopatin V. P. Space bistatic radar to monitor the ocean surface profile based on GNSS signals. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 5. P. 484—491 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-5-484-491