

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТЫ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ БИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

О. В. ГОРЯЧКИН, И. В. МАСЛОВ

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,  
443010, Самара, Россия  
E-mail: oleg.goryachkin@gmail.com*

Представлены результаты теоретического исследования влияния ионосферы на точность расчета высоты рельефа местности с помощью бистатистического интерферометра на базе космического радиолокатора с синтезированной апертурой Р-диапазона и наземного пункта приема. Определены статистические характеристики случайных флуктуаций сигнала. Представлен метод расчета ошибки определения высоты в зависимости от геометрии интерферометра, влияния параметров ионосферы, аддитивного шума, пространственной независимости радиолокационных изображений. По представленным численным зависимостям можно оценить оптимальный диапазон значений интерферометрической базы и ошибку определения высоты точечных и протяженных целей. При отражении от протяженных целей дополнительно учитывается погрешность, обусловленная пространственной независимостью отраженных сигналов в одном элементе разрешения.

**Ключевые слова:** радиолокатор с синтезированной апертурой, бистатистический радиолокатор, двухпроходная РСА-интерферометрия, погрешность измерения высоты местности, влияние ионосферы

Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) являются эффективным инструментом дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Одно из главных преимуществ использования радиолокационных систем ДЗЗ по сравнению с оптическими системами — возможность применения интерферометрического метода для построения цифровых моделей рельефа (ЦМР) местности. При реализации интерферометрических РСА различают однопроходные и многопроходные (интерферометрическая база в первом случае создается за один проход РСА с двумя антеннами, во втором — за два и более прохода РСА с одной антенной), однопозиционные и многопозиционные системы. Частным случаем многопозиционной системы является бистатистическая конфигурация, когда передатчик и приемник разнесены в пространстве.

В настоящее время ведутся исследования возможности создания и применения для интерферометрических наблюдений РСА космического базирования, работающих в Р- и УКВ-диапазонах частот [1—7]. Существенным препятствием является деструктивное влияние ионосферы, ограничивающее получение радиолокационных изображений требуемого качества и соответственно ЦМР местности с требуемой точностью.

Как показано в работах [8—12], пространственное разрешение космических РСА вследствие потери когерентности при распространении сигнала в ионосфере Земли в Р-диапазоне длин волн не может быть лучше 15—25 м. При использовании адаптивных методов обработки, если опираться на оценки, полученные в [13], пространственное разрешение может составить 10—20 м.

С другой стороны, определенные Регламентом радиосвязи правила ограничивают разрешенную полосу частот для реализации космической РСА в Р-диапазоне величиной в 5 МГц, что, в свою очередь, означает пространственное разрешение в 30 м. Однако, как

замечено в работе [14], существуют возможности расширения полосы используемых частот до 30 МГц, что означает пространственное разрешение в 5 м в отсутствие влияния ионосферы.

Возможно получение радиолокационных изображений (РЛИ) высокого разрешения в Р- и УКВ-диапазонах за счет применения бистатической РСА и размещения наземной приемной позиции (ПП) в некоторой близости от объекта радиолокационной съемки [2, 3]. При такой схеме удастся компенсировать деструктивное влияние ионосферы в наземном пункте приема за счет совместной обработки сигналов, отраженных от цели, и сигналов от радиолокатора.

Данная схема построения бистатической РСА в Р-диапазоне реализована на российском малом космическом аппарате (МКА) „Аист-2Д“, выведенном на орбиту 28 апреля 2016 г. Таким образом, в рамках бистатической схемы возможно достижение пространственного разрешения в 5 и 30 м при использовании полосы частот 30 МГц.

Аналізу пространственного разрешения космической РСА в Р-диапазоне посвящено значительное число публикаций, тогда как погрешность измерения высоты рельефа местности бистатической радиолокационной системой космического базирования в этом диапазоне практически не исследована в литературе.

Таким образом, в отличие от работ [4, 5], где проведен анализ влияния ионосферы при моностатической интерферометрической схеме съемки, в настоящей статье представлен метод оценивания точности определения высоты рельефа местности двухпроходным бистатическим интерферометром Р-диапазона с наземной приемной частью.

На рис. 1 условно изображена геометрия проведения съемки, где МКА<sub>1</sub> и МКА<sub>2</sub> — проекции траектории полета спутника при первом и втором проходе соответственно;  $S_{оп}(t, x, y)$  — комплексный опорный (прямой) сигнал от КА;  $S_{пр}(t)$  — комплексный сигнал, принятый (отраженный) в области (точке) измерений;  $B$  — база между двумя положениями (или проходами МКА);  $\alpha$  — угол наклона базы;  $\theta$  — угол визирования;  $H_1, H_2$  — высота орбиты первого и второго МКА;  $D_1, D_2$  — удаление от области измерений,  $h$  — искомая высота рельефа местности;  $R_3$  — радиус Земли.

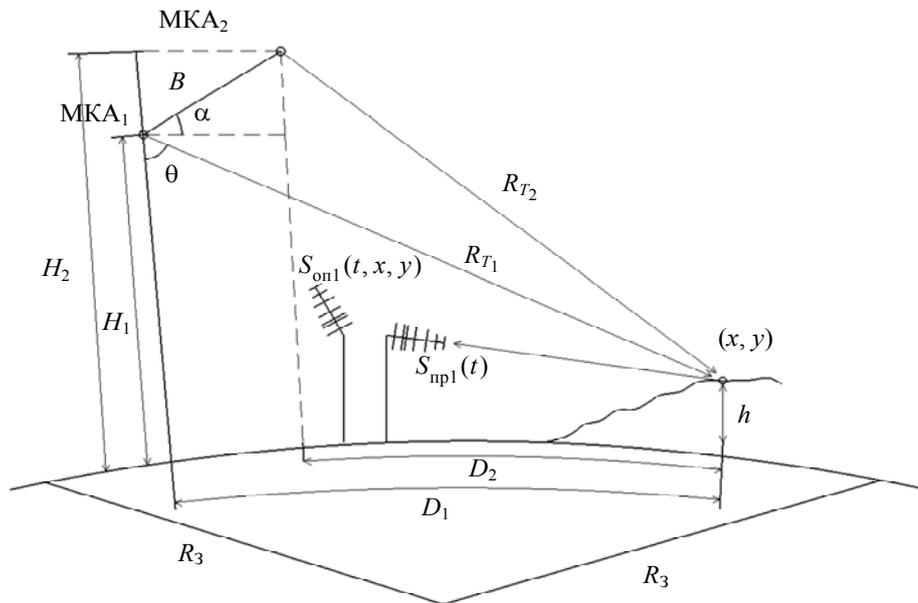


Рис. 1

Пусть  $S_0(t)$  — последовательность зондирующих импульсов, излучаемых передатчиком РСА. Тогда излученный первым МКА сигнал, отраженный от цели с координатами  $(x, y, h)$  и принятый по прямой траектории, определяется как

$$\begin{aligned} \dot{S}_{\text{отр1}}(t) &= \dot{\xi}_1 \dot{S}_0(t - \tau_{12}(t, x, y, h) - \delta_{12}(t, x, y, h)); \\ \dot{S}_{\text{пр1}}(t) &= \dot{S}_0(t - \tau_{11}(t) - \delta_{11}(t)), \end{aligned}$$

где  $\tau_{12}(t, x, y, h)$  и  $\delta_{12}(t, x, y, h)$  — регулярная и случайная задержки сигнала на трассе МКА<sub>1</sub> — цель — ПП,  $\tau_{11}(t)$  и  $\delta_{11}(t)$  — регулярная и случайная задержки сигнала на трассе МКА<sub>1</sub> — ПП,  $\dot{\xi}_1$  — комплексный коэффициент отражения.

Сигнал точечной цели с координатами  $(x_0, y_0, h)$  на первом РЛИ определяется как

$$\begin{aligned} \dot{I}_1(x, y) &= \\ &= \dot{\xi}_1 \int \dot{S}_0(t - \tau_{12}(t, x_0, y_0, h) - \delta_{12}(t, x_0, y_0, h)) S_0^*(t - \tau_{12}(t, x, y, 0) - \delta_{11}(t)) dt + \dot{N}_1(x, y), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\dot{N}_1(x, y)$  — аддитивный комплексный гауссов шум первого РЛИ; интегрирование производится на интервале синтеза апертуры  $T_s: [-T_s/2, T_s/2]$ .

Используя равенство Рэлея для преобразования Фурье, разбивая интервал синтеза апертуры на интервалы, равные периоду повторения зондирующего  $k$ -го импульса  $T_r$ ,  $[t_k - T_r/2, t_k + T_r/2]$ , и учитывая постоянство задержки сигнала на этих интервалах, получаем

$$\dot{I}_1(x, y) = \frac{\dot{\xi}_1}{2\pi} \int |\dot{S}_0(j\omega)|^2 \sum_k \exp(-j\omega(\Delta\tau_{12}(t_k, x, y) + \delta_1(t_k))) d\omega + \dot{N}_1(x, y), \quad (2)$$

где  $\Delta\tau_{12}(t_k, x, y) = \tau_{12}(t_k, x_0, y_0, h) - \tau_{12}(t_k, x, y, 0)$  — регулярная составляющая,  $\delta_1(t_k) = \delta_{12}(t_k, x_0, y_0, h) - \delta_{11}(t_k)$  — случайная; в этом выражении полагаем также, что регулярное искажение огибающей зондирующих импульсов на трассе распространения в ионосфере носит чисто фазовый характер и компенсируется при совместной обработке отраженного и прямого сигналов в наземном пункте приема.

Пусть  $\frac{1}{2\pi} \int |\dot{S}_0(j\omega)|^2 \exp(j\omega t) d\omega = \dot{g}_0(t)$ , тогда

$$\dot{I}_1(x, y) = \dot{\xi}_1 \sum_k \exp(-j\omega_0(\Delta\tau_{12}(t_k, x, y) + \delta_1(t_k))) \dot{g}_0(\Delta\tau_{12}(t_k, x, y) + \delta_1(t_k)) + \dot{N}_1(x, y). \quad (3)$$

Далее разложим  $\tau_{12}(t, x_0, y_0, h)$  в ряд Маклорена по переменным  $(t, h)$  и ограничимся следующими членами ряда:

$$\tau_{12}(t, x_0, y_0, h) \approx \tau_{12}(0, x_0, y_0, 0) + \tau'_{12}(0, x_0, y_0, 0)h + \tau''_{12}(0, x_0, y_0, 0)t + \frac{1}{2} \tau'''_{12}(0, x_0, y_0, 0)t^2,$$

тогда  $\Delta\tau_{12}(t_k, x_0, y_0) \approx \tau'_{12}(0, x_0, y_0, 0)h$  и  $\Delta\tau_{22}(t_k, x_0, y_0) \approx \tau'_{22}(0, x_0, y_0, 0)h$ .

Положим, далее, что разрешение по наклонной дальности таково, что миграция сигнала в канале дальности незначительна, т.е.  $g_0(\Delta\tau_{12}(t_k, x_0, y_0) + \delta_1(t_k)) \approx 1$  для любого  $k$ , тогда два РЛИ определяются выражениями

$$\begin{aligned} \dot{I}_1(x_0, y_0) &= \dot{\xi}_1 \exp(-j\omega_0 \tau'_{12}(0, x_0, y_0, 0)h) \sum_k \exp(-j\omega_0 \delta_1(t_k)) + \dot{N}_1(x_0, y_0), \\ \dot{I}_2(x_0, y_0) &= \dot{\xi}_2 \exp(-j\omega_0 \tau'_{22}(0, x_0, y_0, 0)h) \sum_k \exp(-j\omega_0 \delta_2(t_k)) + \dot{N}_2(x_0, y_0). \end{aligned} \quad (4)$$

Интерферометрическая разность фаз в точке  $(x_0, y_0)$  может быть найдена как

$$\Delta\varphi = \arg[\dot{I}_1(x_0, y_0) \dot{I}_2^*(x_0, y_0)] = \arg[\dot{z}]. \quad (5)$$

Подставляя выражения (4) в (5) и опуская  $(x_0, y_0)$ , получаем

$$\dot{z} = \dot{\xi}_1 \dot{\xi}_2^* \dot{I}_{01}^* \dot{I}_{02}^* + \dot{\xi}_1 \dot{I}_{01} N_2^* + \dot{N}_1 \dot{\xi}_2^* \dot{I}_{02}^* + \dot{N}_1 N_2^*, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{I}_{01} &= \exp(-j\omega_0 \tau'_{12}(0, x_0, y_0, 0)h) \sum_k \exp(-j\omega_0 \delta_1(t_k)), \\ \dot{I}_{02} &= \exp(-j\omega_0 \tau'_{22}(0, x_0, y_0, 0)h) \sum_k \exp(-j\omega_0 \delta_2(t_k)). \end{aligned}$$

В силу закона больших чисел  $\dot{z}$  — случайный вектор, имеющий гауссовское распределение. Для оценки погрешности определения высоты найдем вероятностное распределение  $\Delta\varphi$ .

При анализе погрешности интерферометрического РСА можно рассматривать отражение от стабильных отражателей с заданной эффективной площадью рассеяния (ЭПР) (точечная цель). В этом случае погрешность расчета высоты цели определяется геометрией наблюдения, шумом и влиянием атмосферы.

При отражении от поверхностно-распределенных целей (протяженная цель) дополнительно учитывается погрешность, обусловленная пространственной независимостью отраженных сигналов в одном элементе разрешения [4]. Для учета этой составляющей погрешности положим, что коэффициент отражения  $\dot{\xi}_1$  формируется следующим образом:

$$\dot{\xi}_1 \approx \int_{-\Delta x/2}^{\Delta x/2} \int_{-\Delta y/2}^{\Delta y/2} \dot{\eta}(x, y) \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} y \sin \theta_1\right) dx dy,$$

где  $\dot{\eta}(x, y)$  — коэффициент отражения диффузно рассеивающей поверхности,  $\Delta x$  — разрешение по азимуту,  $\Delta y$  — разрешение по дальности,  $\theta_1$  — угол падения.

Проведем, далее, численный анализ погрешности. Для круговой орбиты получим

$$\begin{aligned} \Delta\tau'_{12} &= \\ &= \frac{1}{c} \left[ \frac{R_3 - (R_3 + H_1) \cos\left(\frac{D_1}{R_3}\right)}{\sqrt{R_3^2 \sin^2\left(\frac{D_1}{R_3}\right) + \left(R_3 + H_1 - R_3 \cos\left(\frac{D_1}{R_3}\right)\right)^2}} - \frac{R_3 - (R_3 + H_2) \cos\left(\frac{D_2}{R_3}\right)}{\sqrt{R_3^2 \sin^2\left(\frac{D_2}{R_3}\right) + \left(R_3 + H_2 - R_3 \cos\left(\frac{D_2}{R_3}\right)\right)^2}} \right]. \end{aligned}$$

Искомое распределение фазы в соответствии с [5] имеет вид:

$$W_4(\varphi) = \frac{\sigma_x \sigma_y \exp\left(-\frac{m_x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{m_y^2}{2\sigma_y^2}\right)}{2\pi(\sigma_y^2 \cos^2 \varphi + \sigma_x^2 \sin^2 \varphi)} \left(1 + k\sqrt{\pi} \cdot e^{k^2} [1 + \Phi(\sqrt{2} \cdot k)]\right), \quad -\pi \leq \varphi \leq \pi, \quad (7)$$

где  $k = \frac{m_x \sigma_y^2 \cos \varphi + m_y \sigma_x^2 \sin \varphi}{\sigma_x \sigma_y \sqrt{\sigma_y^2 \cos^2 \varphi + \sigma_x^2 \sin^2 \varphi}}$ ,  $\Phi(\sqrt{2} \cdot k) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\sqrt{2} \cdot k} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  — функция Крампа.

Учитывая представленную геометрию съемки (см. рис. 1), запишем ошибку определения высоты

$$\delta h = \sqrt{d\{\Delta\varphi\}} / \omega_0 |\Delta\tau'_{12}|,$$

где  $d\{\Delta\varphi\}$  — дисперсия фазы, найденная по распределению (7).

В качестве исходных данных для расчета используем представленные ниже характеристики бистатического радиолокационного комплекса Р-диапазона, установленного на МКА „Аист-2Д“ [15].

Разрешение, азимут×дальность, м .....	30×30
Удаление КА от области измерений, км .....	500
Время синтеза, с .....	0,8—2,2
Ширина полосы частот, МГц .....	6—30
Отношение сигнал/шум:	
для точечной цели, дБ .....	Не хуже 14
для распределенной цели, дБ .....	Не хуже 16
Масштаб неоднородностей в ионосфере, м .....	1000—10 000
Удельная ЭПР протяженной цели, дБ .....	-20
ЭПР точечной цели, м <sup>2</sup> .....	5
Угол наклона базы, ...° .....	45
Импульсная мощность, Вт .....	180

Полученные данные расчетов проиллюстрированы на рис. 2 и 3 зависимостями дисперсии фазы (а) и ошибки определения высоты (б) от размера интерферометрической базы  $B$  для точечной цели (кривая 1) и протяженной цели (кривая 2) при концентрации электронов  $N_e = 10^{12}$  и  $N_e = 10^{10}$  соответственно и масштабе неоднородностей ионосферы 1000 м. На графиках ошибки высоты вертикальной штриховой линией показан предел однозначной оценки интерферометрической фазы в 1 пкс радиолокационного изображения.

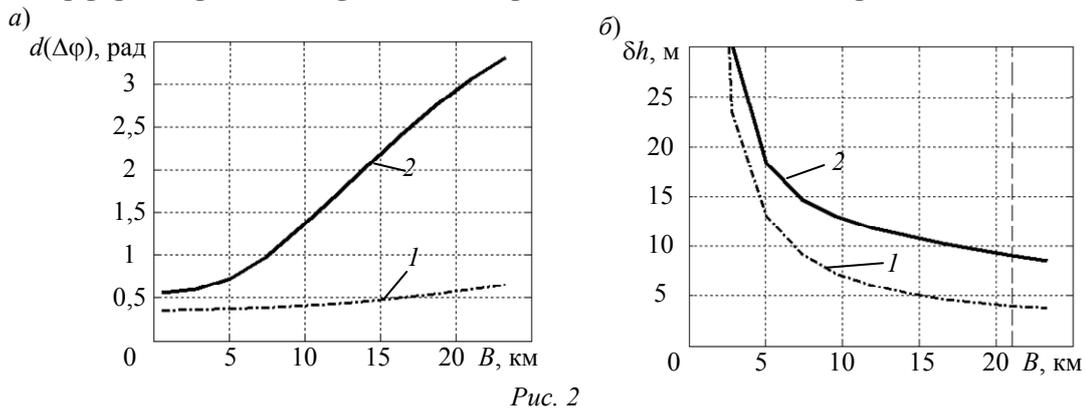


Рис. 2

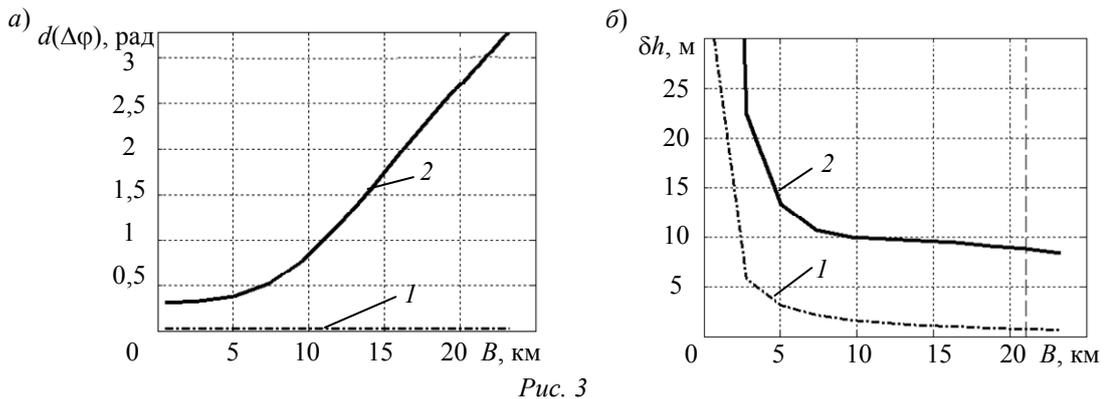


Рис. 3

Таким образом, бистатическая схема построения интерферометрического РСА в Р-диапазоне частот (как на МКА „Аист-2Д“) обеспечивает приемлемую точность расчета высоты при наблюдении точечных целей как при спокойной, так и при возмущенной ионосфере при использовании полосы частот 6 МГц. При наблюдении протяженных целей и при спокойной, и при возмущенной ионосфере приемлемая точность определения высоты достигается только при использовании полосы частот 30 МГц.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ramongassie S., Valle P., Orlando G., Arpesi P., Helière F., Arcioni M. P-band SAR instrument for BIOMASS // EUSAR. 2014. P. 1156—1159.
2. Akhmetov R., Goriachkin O., Ivachenko E., Kovalenko A., Riemann V., Stratilatov N., Tkachenko S. Multi-positional VHF-band SAR system for Earth observation on the basis of microsatellites // URSI-F, 7th Training Workshops, Garmisch-Partenkirchen, Germany, March 2011. P. 78—80.
3. Borisenkov A., Goriachkin O., Dmitrenko V., Dolgoplov V., Zhengurov B., Juravlev A., Kurkova I., Khohlov S. Bistatic P-band SAR for spacecraft AIST-2 // Procedia Engineering. 2015. Vol. 104. P. 2—8.
4. Zhu X., Zhang Q., Zhang Y., Dong Z. Analysis of background ionospheric effects on low frequency repeat-pass InSAR system // Radar Conf. 2015.
5. Chen A., Zebker H. Reducing ionospheric effects in InSAR data using accurate coregistration // IEEE Transact. on Geoscience and Remote Sensing. 2014. Vol. 52. P. 50—60.
6. Zebker H., Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes // IEEE Transact. on Geoscience and Remote Sensing. 1992. N 30 (5). P. 950—959.
7. Кловский Д. Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. М.: Радио и связь, 1982. 304 с.
8. Горячкин О. В. Методы слепой обработки сигналов и их приложения в системах радиотехники и связи. М.: Радио и связь, 2003. 230 с.
9. Goriachkin O. V., Klovsy D. D. The some problems of realization spaceborne SAR's in P,UHF,VHF bands // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp., Hamburg, Germany, July 1999. Vol. 2. P. 1271—1273.
10. Goriachkin O. V. Azimuth resolution of spaceborne P,VHF-Band SAR // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2004. Vol. 1, N 4. P. 251—254.
11. Кретов Н. В., Рыжкина Т. Е., Федорова Л. В. Влияние земной атмосферы на пространственное разрешение радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования // Радиотехника и электроника. 1992. № 1. С. 90—95.
12. Ishimaru A., Kuga Y., Liu J., Kim Y., Freeman T. Ionospheric effects on synthetic aperture radar at 100 MHz to 2 GHz // Radio Science. 1999. Vol. 34, N 1. P. 257—268.
13. Горячкин О. В. Статистические характеристики фазовых флуктуаций траекторного сигнала трансionoсферных РЛС с синтезированной апертурой // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2003. Т. 6, № 3. С. 33—38.
14. Неронский Л. Б., Михайлов В. Ф., Брагин И. В. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны: Учеб. пособие. СПб: СПбГУАП, 1999. Ч. 2. 220 с.
15. Кирилин А. Н., Ахметов Р. Н., Шахматов Е. В., Ткаченко С. И., Бакланов А. И., Салмин В. В., Семкин Н. Д., Ткаченко И. С., Горячкин О. В. Опытнo-технологический малый космический аппарат „АИСТ-2Д“. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. 324 с.

**Сведения об авторах**

- Олег Валериевич Горячкин** — д-р техн. наук, доцент; Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, кафедра теоретических основ радиотехники и связи; заведующий кафедрой; E-mail: oleg.goryachkin@gmail.com
- Иван Владимирович Маслов** — аспирант; Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, кафедра теоретических основ радиотехники и связи; E-mail: macloff@mail.ru

Поступила в редакцию  
07.12.18 г.

**Ссылка для цитирования:** Горячкин О. В., Маслов И. В. Оценка погрешности измерения высоты рельефа местности бистатической радиолокационной системой космического базирования // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 5. С. 477—483.

## ESTIMATION OF THE MEASUREMENT ERROR OF TERRAIN RELIEF WITH BISTATIC SPACE-BASED RADAR SYSTEM

O. V. Goryachkin, I. V. Maslov

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics,  
443010, Samara, Russia  
E-mail: oleg.goryachkin@gmail.com*

Results of theoretical study of the influence of the ionosphere on the accuracy of the terrain elevation measurements using a bistatic interferometer are presented. The interferometer under consideration is based on space radar with synthesis of the P-band aperture and ground receiving point. The necessary statistical characteristics of random signal fluctuations are determined. A method for calculating the error in the height estimates depending on the interferometer geometry, the effect of ionosphere parameters, additive noise, and spatial decorrelation of radar images is described. According to the presented numerical dependences, it is possible to estimate the optimal range of values of the interferometric base and the error in determining the height for both point and extended targets. In the case of reflection from extended targets, the error due to the spatial decorrelation of the reflected signals in a single resolution element is considered additionally.

**Keywords:** synthetic aperture radar (SAR), bistatic radar, two-pass SAR interferometer, error of elevation measurement, effect of ionosphere

### REFERENCES

1. Ramongassie S., Valle P., Orlando G., Arpesi P., Helière F., Arcioni M. *EUSAR*, 2014, pp. 1156–1159.
2. Akhmetov R., Goriachkin O., Ivachenko E., Kovalenko A., Riemann V., Stratilatov N., Tkachenko S. *URSI-F, 7th Training Workshops Garmisch-Partenkirchen*, Germany, March, 2011, pp. 78–80.
3. Borisenkov A., Goriachkin O., Dmitrenok V., Dolgopopolov V., Zhengurov B., Juravlev A., Kurkova I., Khohlov S. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 104, pp. 2–8.
4. Zhu X., Zhang Q., Zhang Y., Dong Z. *Radar Conf.*, 2015.
5. Chen A., Zebker H. *IEEE Transact. on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, vol. 52, pp. 50–60.
6. Zebker H., Villasenor J. *IEEE Transact. on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, no. 30 (5), pp. 950–959.
7. Kloviskiy D.D. *Peredacha diskretnykh soobshcheniy po radiokanalam* (The Transfer of Discrete Messages over the Radio), Moscow, 1982, 304 p. (in Russ.)
8. Goriachkin O.V. *Metody slepoy obrabotki signalov i ikh prilozheniya v sistemakh radiotekhniki i svyazi* (Blind Signal Processing Methods and Their Applications in Radio Engineering and communication Systems), Moscow, 2003, 230 p. (in Russ.)
9. Goriachkin O.V., Kloviskiy D.D. *Proc. IEEE 1999 Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, Hamburg, Germany, July 1999, vol. 2, pp. 1271–1273.
10. Goriachkin O.V. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, no. 4(1), pp. 251–254.
11. Kretov N.V., Ryzhkina T.E., Fedorova L.V. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 1992, no. 1, pp. 90–95. (in Russ.)
12. Ishimaru A., Kuga Y., Liu J., Kim Y., Freeman T. *Radio Science*, 1999, no. 1(34), pp. 257–268.
13. Goriachkin O.V. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2003, no. 3(6), pp. 33–38. (in Russ.)
14. Neronovskiy L.B., Mikhaylov V.F., Bragin I.V. *Mikrovolnovaya apparatura distantsionnogo zondirovaniya Zemli i atmosfery. Radiolokatory s sintezirovannoy aperturoy anteny* (Microwave Equipment for Remote Sensing of the Earth and the Atmosphere. Antenna Synthetic Aperture Radars), St. Petersburg, 1999, Pt. 2, 220 p. (in Russ.)
15. Kirilin A.N., Akhmetov R.N., Shakhmatov Ye.V., Tkachenko S.I., Baklanov A.I., Salmin V.V., Semkin N.D., Tkachenko I.S., Goryachkin O.V. *Opytno-tekhnologicheskii malyy kosmicheskii apparat „AIST-2D“* (Experimental technological small spacecraft AIST-2D), Samara, 324 p. (in Russ.)

### Data on authors

- Oleg V. Goryachkin** — Dr. Sci., Associate Professor; Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering and Communication; Head of the Department; E-mail: oleg.goryachkin@gmail.com
- Ivan V. Maslov** — Post-Graduate Student; Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering and Communication; E-mail: maclloff@mail.ru

**For citation:** Goryachkin O. V., Maslov I. V. Estimation of the measurement error of terrain relief with bistatic space-based radar system. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 5. P. 477–483 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-5-477-483