

DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-127-134

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ БОРТОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ ПРИ СЕКТОРНОМ ОБЗОРЕ

Е.Е. НЕЧАЕВ<sup>1</sup>, К.С. ДЕРЯБИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ПАО «Туполев», г. Москва, Россия

Одним из недостатков интерферометрических бортовых радиолокационных станций с синтезированием апертуры антенны является относительно узкая, по сравнению с аналогичными системами космического базирования, полоса обзора. Увеличение полосы обзора при боковом обзоре интерферометра возможно за счет увеличения высоты полета и угла визирования, при этом снижается точность измерения высоты из-за увеличения наклонной дальности. Другим возможным вариантом увеличения полосы обзора является использование обзора отличного от бокового. В статье рассматривается эффективность применения секторного обзора в бортовых радиолокационных станциях с синтезированием апертуры антенны в режиме интерферометрии. Приводится математическая модель и описание геометрии процесса интерферометрического измерения высоты при секторном обзоре. Проведён анализ влияния высоты подстилающей поверхности и угла наблюдения на изменение фазы отраженного сигнала. Показано, что изменение угла наблюдения вносит дополнительный вклад в изменение фазы. Проведен расчет потенциальной точности измерения высоты. Результаты расчета показывают, что увеличение угла наблюдения снижает точность измерения высоты. Максимальное снижение точности наблюдается при угле наблюдения 90°. Несмотря на некоторое снижение точности измерения высоты, применение секторного обзора позволяет расширить полосу обзора. Снижение точности измерения высоты можно ограничить путем выбора оптимальных параметров сканирования.

**Ключевые слова:** интерферометрические радиолокационные станции с синтезированием апертуры антенны, секторный обзор.

Получение цифровых моделей местности в районах с быстроменяющейся обстановкой является важной задачей для многих отраслей народного хозяйства и науки [1, 2, 4, 6].

Одним из способов получения информации о высоте местности является использование бортовых радиолокационных станций с синтезированием апертуры антенны в интерферометрическом режиме [3, 5, 7–11].

Основным недостатком систем, использующих в качестве носителя воздушные суда, является высокая стоимость получаемой цифровой модели местности по сравнению с аналогичными системами космического базирования из-за относительно малой полосы обзора.

Существующие интерферометрические бортовые радиолокационные станции с синтезированием апертуры антенны (ИФРСА) воздушного базирования для измерения высоты используют поперечную интерферометрическую базу и боковой обзор (направление максимума диаграммы направленности перпендикулярно направлению движения самолета-носителя). В этом случае ширина полосы обзора ИФРСА зависит от ширины луча, высоты полета и угла визирования. Для увеличения полосы обзора необходимо увеличивать высоту полета самолета-носителя и угол визирования, что приводит к уменьшению точности измерения высоты. Для расширения полосы обзора без изменения наклонной дальности можно использовать секторный обзор.

Секторный обзор подразумевает отклонение угла наблюдения луча антенны от значения  $\frac{\pi}{2}$  в процессе сканирования (рис. 1). Рассмотрим влияние угла наблюдения на точность измерения высоты.

В процессе интерферометрической обработки ИФРСА формирует два радиолокационных изображения (РЛИ) одного и того же участка местности. Информация о высоте в конкретной точке содержится в разности фаз соответствующих пикселей двух РЛИ. Следовательно, точность измерения высоты в ИФРСА зависит от точности измерения фазы в каждой точке пары РЛИ.

Рассмотрим влияние высоты и угла наблюдения на фазу отраженного сигнала. Геометрия, описывающая это влияние, изображена на рис. 2.

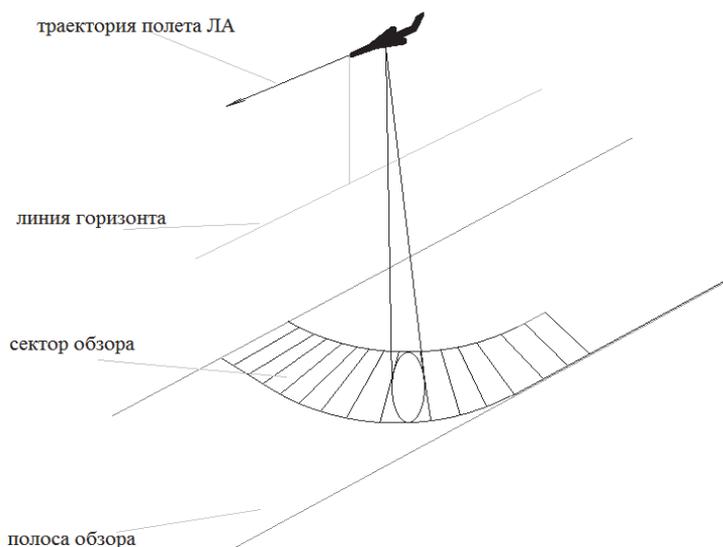


Рис. 1. Секторный обзор БРЛС  
Fig. 1. Sector scan of synthetic aperture radar

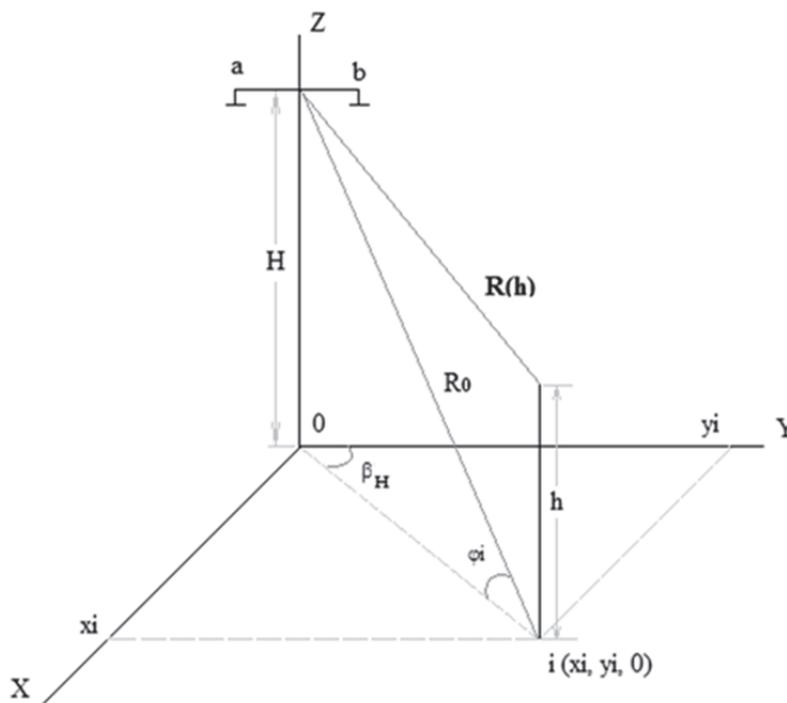


Рис. 2. Система координат ИФРСА при секторном обзоре  
Fig. 2. Coordinate system of IFSAR with sector scan

Фаза принятого сигнала зависит от расстояния до цели:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} R. \quad (1)$$

Наклонная дальность до точки на поверхности референц-эллипсоида определяется следующим образом:

$$R_0 = \sqrt{H^2 + x_i^2 + y_i^2}. \quad (2)$$

При изменении высоты наклонная дальность до цели становится ее функцией [1]:

$$R(h) = \sqrt{(H - h)^2 + x_i^2 + y_i^2}. \quad (3)$$

Чтобы оценить влияние изменения высоты на изменение фазы принятого сигнала, продифференцируем функцию  $R(h)$  относительно изменения высоты:

$$\frac{dR(h)}{dh} = \frac{1}{2} \cdot [(H - h)^2 + x_i^2 + y_i^2]^{-\frac{1}{2}} \cdot (2h - 2H) = \frac{h - H}{\sqrt{(H - h)^2 + x_i^2 + y_i^2}};$$

$$dR(h) = - \left[ \frac{H - h}{R(h)} \right] \cdot dh. \quad (4)$$

Подставив  $h = 0$  в (4), получим выражение, описывающее влияние высоты цели на расстояние до цели:

$$R(h) = - \left( \frac{H}{R_0} \right) \cdot dh = - \left( \frac{H \cos \beta_n \cdot \cos \varphi_i}{y_i} \right) \cdot dh. \quad (5)$$

Изменение фазы принятого сигнала будет равно

$$|d\phi| = \frac{4\pi \cdot H \cos \beta_n \cdot \cos \varphi_i}{\lambda \cdot y_i} \cdot dh. \quad (6)$$

При  $\beta_n = 0$ , что соответствует боковому обзору, фаза принятого сигнала будет зависеть только от высоты цели.

На рис. 3 показано влияние угла наблюдения на фазу принятого сигнала.

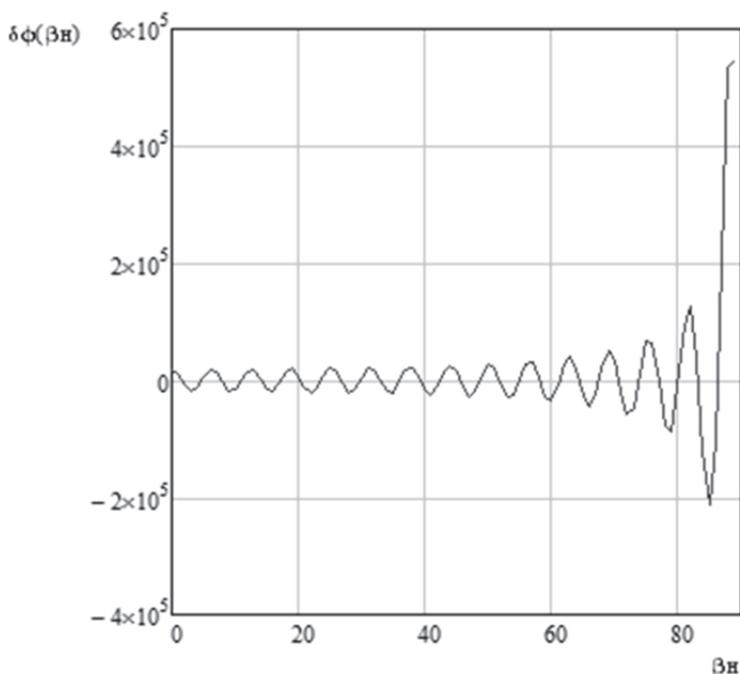


Рис. 3. Влияние угла наблюдения на фазу принятого сигнала  
Fig. 3. Influence of the observation angle on the phase of a received signal

Определим потенциальную точность измерения высоты при различных углах наблюдения. Геометрия задачи для определения высоты изображена на рис. 4.

Проекция наклонных дальностей первой и второй антенны на плоскость YOZ соответственно будут равны

$$R_H \cdot \cos\beta_a \equiv R, \quad (7)$$

$$(R_H + \Delta R) \cdot \cos\beta_b \equiv r. \quad (8)$$

Проекция наклонной дальности первой антенны является линией равных углов. Высота цели определяется следующим образом:

$$h = H - R \cdot \sin\varphi_{\perp}. \quad (9)$$

Разность расстояний от антенн ИФРСА до цели

$$r^2 = B^2 + R^2 - 2BR \cdot \cos(\varphi_{\perp} + \varphi_{\phi}). \quad (10)$$

Подставив (7) и (8) в (9) и (10) соответственно получим

$$h = H - R_H \cos\beta_a \cdot \sin\varphi_{\perp}; \quad (11)$$

$$(R_H + \Delta R)^2 = \frac{B^2 + R_H^2 \cos^2\beta_a - 2BR_H \cos\beta_a \cdot \cos(\varphi_{\perp} + \varphi_{\phi})}{\cos^2\beta_b}.$$

Учитывая, что  $R_H \gg \Delta R$  и  $R_H \gg B$  [1],

$$\Delta R \approx \frac{-B \cos\beta_a \cdot \cos(\varphi_{\perp} + \varphi_{\phi})}{\cos^2\beta_b}. \quad (12)$$

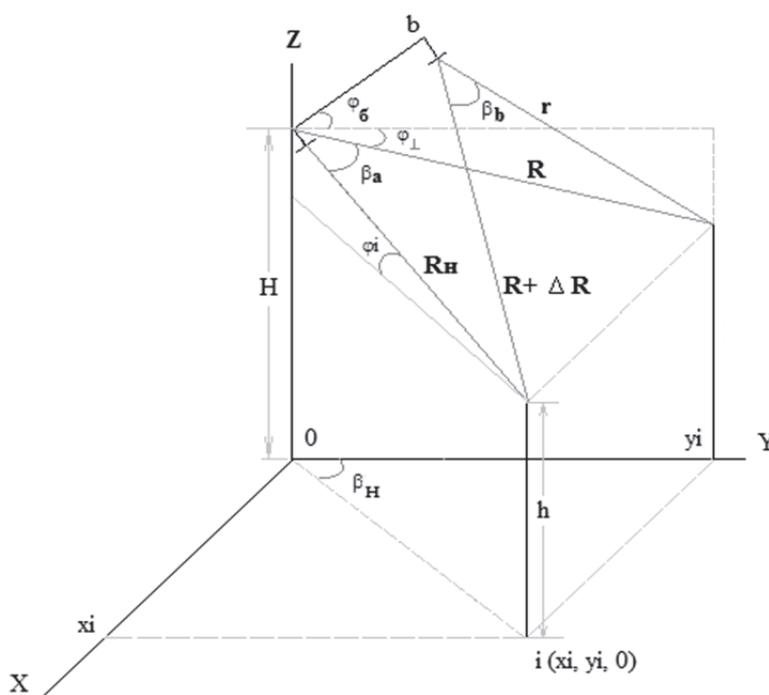


Рис. 4. Геометрия интерферометрического определения высоты  
Fig. 4. Geometry of Interferometric estimation of the height

Продифференцируем измеряемую высоту  $h$  по разности наклонных дальностей  $\Delta R$ :

$$\frac{dh}{d(\Delta R)} = \frac{dh}{d\varphi_{\perp}} \cdot \frac{d\varphi_{\perp}}{d(\Delta R)};$$

$$\frac{dh}{d\varphi_{\perp}} = -R_H \cos\beta_a \cdot \cos\varphi_{\perp}; \quad (13)$$

$$\frac{d\varphi_{\perp}}{d(\Delta R)} = \frac{1}{d(\Delta R)/d\varphi_{\perp}} = \frac{B \cos\beta_a \cdot \sin(\varphi_{\perp} + \varphi_6)}{\cos^2\beta_b}. \quad (14)$$

Отсюда

$$\frac{dh}{d(\Delta R)} = \frac{-R_H \cos\varphi_{\perp} \cdot \cos^2\beta_b}{B \sin(\varphi_{\perp} + \varphi_6)},$$

$$|dh| = \frac{-R_H \cos\varphi_{\perp} \cdot \cos^2\beta_b}{B \sin(\varphi_{\perp} + \varphi_6)} \cdot |d(\Delta R)|. \quad (15)$$

С учётом (12) получим

$$|dh| = \frac{\lambda R_H \cos\varphi_{\perp} \cdot \cos^2\beta_b}{4\pi B \sin(\varphi_{\perp} + \varphi_6)} \cdot |d\phi|. \quad (16)$$

Точность измерения фазы можно представить в виде [2, с. 185]

$$|\delta\phi| = \frac{1}{\sqrt{q}}, \quad (17)$$

где  $q$  – отношение сигнал-шум.

Выразив углы  $\beta_b$  и  $\varphi_{\perp}$  через угол наблюдения  $\beta_H$ , получим окончательное выражение оценки потенциальной точности измерения высоты

$$|dh| = \frac{\lambda R_H \cos \left[ \arcsin \left( \frac{\sin\beta_H \sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{\Delta R} \right) \right] \cdot \cos \left[ \arccos \left( \frac{y_i}{R_H \cos \left( \arcsin \left( \frac{\sin\beta_H \sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{R_H} \right) \right)} \right) \right]}{4\pi \sqrt{q} B \sin \left[ \left( \frac{y_i}{R_H \cos \left( \arcsin \left( \frac{\sin\beta_H \sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{R_H} \right) \right)} \right) + \varphi_6 \right]}, \quad (18)$$

где  $\Delta R$  определяется следующим образом:

$$\Delta R = \sqrt{[x_i^2 + (y_i - B \cos \varphi_0)^2]^2 + [B \sin \varphi_0 + R_H \sin \varphi_0]^2}. \quad (19)$$

При секторном режиме обзора угол наблюдения  $\beta_H$  изменяется по закону [3, с. 85]

$$\beta_H(t) = \beta_0 + \int_0^t \Omega_A(\tau) d\tau, \quad (20)$$

где  $\beta_0$  – начальный угол наблюдения,  $\Omega_A(\tau)$  – угловая скорость перемещения луча диаграммы направленности.

Рассчитаем потенциальную точность измерения высоты для следующих условий полета: высота полета – 10000 м, наклонная дальности до цели – 18000 м, длина интерферометрической базы – 10 м, длина волны – 3,75 см, угол наклона базы –  $0^\circ$ , высота подстилающей поверхности постоянна – 100 м. Зависимость точности измерения высоты от угла изображена на рис. 5.

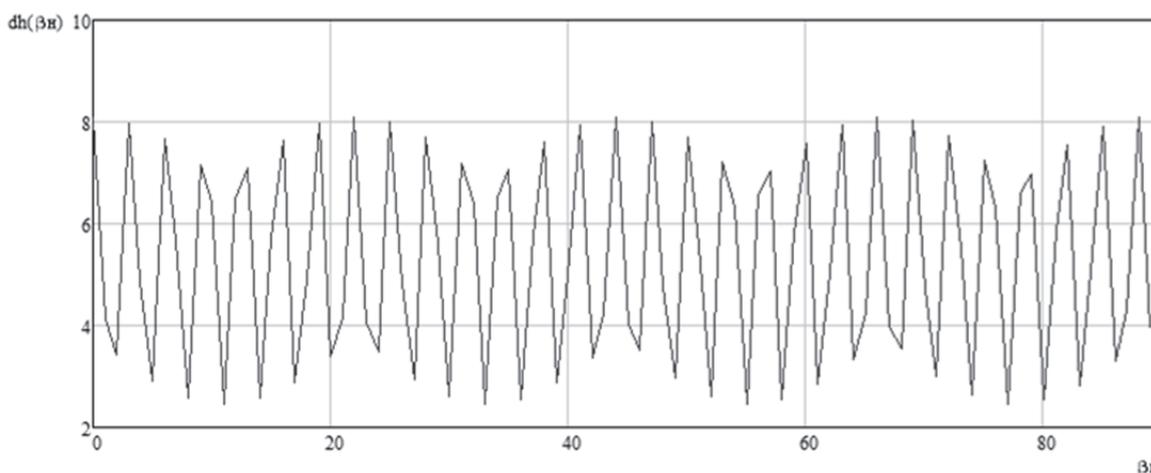


Рис. 5. График зависимости точности измерения высоты от угла наблюдения  
Fig. 5. Graph of accuracy relationship between the estimation height and the observation angle

Средняя точность определения высоты для данных условий составляет  $\sim 7$  м.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Максимальное влияние угла наблюдения на фазу принятого сигнала будет при угле наблюдения  $90^\circ$ .
2. Полученные результаты измерения потенциальной точности показывают возможность работы ИФРСА с использованием секторного обзора.
3. Уменьшение точности измерения высоты, вызванное изменением угла наблюдения, можно ограничить путем выбора оптимальных параметров сканирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mark A.R. A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing. IEEE A&E Systems Magazine, vol. 22, N 9, 2007.
2. Авиационные системы радиовидения. Монография / В.Н. Антипов, А.Ю. Викентьев, Е.Е. Колтышев, Г.С. Кондратенков, А.А. Лавров, А.Ю. Фролов, В.Т. Янковский: под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2015.

3. Антипов В.Н., Горяинов В.Т., Кулин А.Н. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / под ред. В.Т. Горяинова. М.: Радио и связь, 1988.
4. Бакулев П.А. Радиолокационные станции. М.: Радиотехника, 2004.
5. Кондратенков Г.С. Радиолокационные станции обзора Земли / Г.С. Кондратенков, В.С. Потехин и др. М.: Радио и связь, 1983.
6. Дудник П. И. Многофункциональные радиолокационные системы: учеб. пособие для вузов / П.И. Дудник, А.Р. Ильчук и др. М.: Дрофа, 2007.
7. Неронский Л.Б., Михайлов В.Ф., Брагин И.В. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны: учеб. пособие. СПб., 1999.
8. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии / пер. с нем. М.: Мир, 1988.
9. Елизаветин И.В. Условия получения космическим РСА стереоизображений для построения цифровых моделей // Исследования Земли из космоса. 1994. No. 3.
10. Доросинский Л.Г., Лысенко Т.М. Классификация пространственно-распределенных объектов по данным РЛС бокового обзора // Радиотехника. 1996. No. 3.
11. Пресняков А.Н. Радиолокационное обнаружение наземных малоразмерных неоднородностей // Радиотехника. 1996. No. 6.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Нечаев Евгений Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления воздушным движением МГТУ ГА, [eenetchaev@mail.ru](mailto:eenetchaev@mail.ru).

**Дерябин Кирилл Сергеевич**, аспирант кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, [deryabin88@bk.ru](mailto:deryabin88@bk.ru).

#### CHARACTERISTICS OF AIRBORNE INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR WITH SECTOR SCAN

**Evgenii E. Nechayev<sup>1</sup>, Kirill S. Deryabin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Production joint-stock company "Tupolev", Moscow, Russia*

#### ABSTRACT

One of the drawbacks of airborne interferometric synthetic aperture radar is a relatively narrow swath compared to analogous space based systems. Increasing the swath with side view of the interferometer can be possible by increasing the flight altitude and angle of sight. At the same time the height measurement accuracy decreases due to slant range distance increase. Another possible way of swath increasing is using sector scan. The efficiency of sector scan using in interferometric synthetic aperture radar is analyzed in this paper. The mathematical model and geometry of height measurement at a sector scan have been discussed. There was made an analysis of the effect of terrain height and observation angle on received signal phase changing. Observation angle changing is shown to contribute to the phase changing. Potential height accuracy measurement was calculated. The calculation results show that increasing the observation angle reduces height accuracy measurement. The maximum accuracy decrease is obtained at the observation angle of 90°. Despite height accuracy measurement decrease applying the sector scan allow to expand the swath. The accuracy decrease can be limited by selecting optimal parameters of scanning.

**Key words:** interferometric synthetic aperture radar, sector scan.

#### REFERENCES

1. Mark A.R. *A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing*. IEEE A&E Systems Magazine, 2007, vol. 22, no. 9.

2. Antipov V.N., Vikentiev A.Yu., Koltashev E.E., Kondratenkov G.S., Lavrov A.A., Frolov A.Yu., Yankovsky V.T. *Aviatsionnye sistemyi radiovideniya* [Aviation system radiovideniya]. M., Radiotekhnika 2015. (in Russian)
3. Antipov V.N., Gorjainov V.T., Kulin A.N. *Radiolokatsionnye stantsii s tsifrovym sintezirovaniem apertury antenyi* [Radar stations with digital synthetic aperture antenna]. M., Radio i svyaz, 1988. (in Russian)
4. Bakulev P.A. *Radiolokacionnye stantsii* [Radar]. M., Radiotekhnika, 2004. (in Russian)
5. Kondratenkov G.S. *Radiolokacionnye stantsii obzora Zemli* [Radar earth observation]. M., Radio i svyaz, 1983. (in Russian)
6. Dudnik P.I. *Mnogofunktsionalnye radiolokacionnye sistemi. Ucheb. posobie dlya vuzov* [Multifunctional radar system. The allowance for high schools]. M., Drofa, 2007. (in Russian)
7. Neronskii L.B., Mihailov V.F., Bragin I.V. *Mikrovolnovaya apparatura distantsionnogo zondirovaniya poverhnosti Zemli i atmosfery. Radiolokatori s sintezirovannoi aperturoi antenyi. Ucheb. Posobie. SPb.,SPb. GU AP*, 1999. (in Russian)
8. Kronberg P. *Distantsionnoe izuchenie Zemli. Osnovi i metodi distantsionnih issledovaniy v geologii* [Remote study of the Earth. Fundamentals and methods of remote sensing methods in Geology]. Per. s nem. M., Mir, 1988. (in Russian)
9. Elizavetin I.V. *Usloviya polucheniya kosmicheskimi RSA stereoizobrazhenii dlya postroeniya cifrovih modelei. Issledovaniya Zemli iz kosmosa* [The Conditions for obtaining a space RSA images for building digital models]. Earth exploration from space, 1994, No. 3. (in Russian)
10. Dorosinskii L.G., Lisenko T.M. *Klassifikatsiya prostranstvenno-raspredeleennykh obektov po dannim RLS bokovogo obzora* [Classification of spatially - distributed objects according to the side-looking radar]. Radiotekhnika, 1996, No. 3. (in Russian)
11. Presnyakov A.N. *Radiolokacionnoe obnaruzhenie nazemnykh malorazmernykh neodnorodnostei* [Radar's detection of small ground-based inhomogeneities]. Radiotekhnika, 1996, No. 6. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Evgenii E. Nechayev**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Air Traffic Control Chair of Moscow State Technical University of Civil Aviation (MSTUCA), [eenetchaev@mail.ru](mailto:eenetchaev@mail.ru).

**Kirill S. Deryabin**, Postgraduate student of Air Traffic Control Chair, MSTUCA, Engineer of Production Joint-Stock Company "Tupolev", [deryabin88@bk.ru](mailto:deryabin88@bk.ru).

Поступила в редакцию 28.02.2017  
Принята в печать 25.05.2017

Received 28.02.2017  
Accepted for publication 25.05.2017