

УДК 621.396.1

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ РСА КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ СПУТНИКА FIA RADAR-1

В.И. ГРИНКЕВИЧ, В.Е. ЛАЗАРЕНКО

Военная академия Республики Беларусь  
Минск–57, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 14 февраля 2012

Рассмотрен один из подходов к оценке возможностей радиолокационных станций с синтезированием апертуры антенны космического базирования по обзору земной поверхности на основе известных данных о параметрах орбит их носителей.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование земли, радиолокационная станция с синтезированием апертуры, космический аппарат.

### Введение

В комплексе мероприятий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса значительная роль отводится радиолокационным системам наблюдения земной поверхности. Применение таких систем обусловлено возможностью ведения радиолокационной съемки независимо от погодных условий, времени суток и года. Средством радиолокационной съемки, установленным на борту космического аппарата (КА), как правило, является радиолокационная станция с синтезированием апертуры антенны (РСА). Основным продуктом ДЗЗ – радиолокационный снимок, процесс получения которого заключается в обработке первичной радиолокационной информации, переданной с КА на наземный пункт. По качеству получаемого изображения радиолокационные снимки несколько уступают оптическим, но вместе с тем, обладают достаточной информативностью для анализа свойств подстилающей поверхности и объектов наблюдения.

Об эффективности космических РСА свидетельствует постоянное увеличение их числа. По сравнению с 2006 годом число КА с РСА возросло на 9 спутников (с 18 в 2006 до 27 в 2011 году), без учета аппаратов, сведенных с орбиты по различным причинам [1]. Вместе с тем, скрытность излучения РСА за счет применения широкополосных сигналов и ограниченность съемки по времени (0,5–10 сек), отсутствие, как правило, сведений о месте и времени съемки, неизменность орбиты КА во время съемки позволяют осуществлять несанкционированное зондирование любых участков земной поверхности. Данное обстоятельство позволяет рассматривать все космические РСА, независимо от заявленных целей их запуска и решаемых ими задач, как средства двойного назначения. При этом возможности большинства таких КА в печати не приводятся [2]. В связи с этим целью статьи является определение потенциальных возможностей космических РСА на основании данных о параметрах их орбит. Исходными данными для проведения исследований являются параметры орбиты нового американского спутника FIA Radar-1 [2].

### Общие сведения о спутнике FIA Radar-1

Спутник FIA Radar-1 с РСА E-305 (рис. 1) разработан компанией Boeing по программе FIA (Future Imaging Architecture). Запуск спутника состоялся 21 сентября 2010 года в 4 часа 3

минуты по UTC (Universal Time Coordinated) с военной базы ВВС США Ванденбер [2]. В каталоге Стратегического командования США спутнику присвоены наименование USA-215, номер 37162 и международное обозначение 2010-046A. Основная цель запуска FIA Radar-1 – замена выслуживших установленный срок КА, функционирующих по программе Lacrosse/Vega/Onyx военного ведомства США [2].

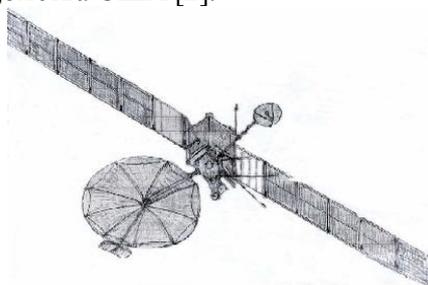


Рис. 1. Эскиз космического аппарата FIA Radar-1

Параметры орбиты спутника: наклонение – 123 град; высота – 1120 км; путевая скорость 7,3 км/сек; период обращения – 107 мин.

Особенностями КА FIA Radar-1 по отношению к спутникам серии Lacrosse/Onyx являются: нестандартное (отрицательное) наклонение орбиты 123 град; увеличение высоты орбиты в среднем на 400 – 450 км, уменьшение общей массы спутника более чем в два раза. Это позволило обеспечить необходимый темп обзора земной поверхности (несмотря на уменьшение орбитальной скорости, обусловленной увеличением высоты орбиты спутника), сократить в среднем в 1,2 раза время синтезирования (вследствие отрицательного наклонения орбиты), увеличить примерно в 1,6 раза дальность действия РСА и размер полосы обзора.

#### Оценки возможностей дистанционного зондирования Земли спутником FIA Radar-1

Одной из основных характеристик РСА, определяющей возможности ДЗЗ, является зона обзора [3]. Зона обзора характеризуется:

- минимальной  $r_{\min}$  и максимальной  $r_{\max}$  дальностями обнаружения (удалением зоны обзора от РСА);
- минимальным  $\varepsilon_{\min}$  и максимальным  $\varepsilon_{\max}$  углами наблюдения (положением зоны обзора относительно линии пути);
- размерами полосы обзора по дальности (кросс курсу)  $\Delta D$  и азимуту (вдоль курса)  $\Delta L$ ;
- размерами полосы одновременного обзора по дальности (кросс курсу)  $\Delta d$  и азимуту (вдоль курса)  $\Delta l$  (в соответствии с режимом функционирования РСА).

Для определения возможностей обзора земной поверхности РСА с учетом известных орбитальных параметров необходимо найти значения углов наблюдения  $\varepsilon_{\min} = \varepsilon$ ,  $\varepsilon_{\max} = \varepsilon'$  (рис. 2), при которых возможно получение радиолокационной информации заданного качества.

Количественной мерой, определяющей качество радиолокационной информации, является разрешающая способность по горизонтальной дальности (кросс курсу)  $\delta D$  и азимуту (вдоль курса)  $\delta l$ , значения которых могут быть найдены по формулам [3]:

$$\delta D = \frac{c}{2\Delta f \cos \varphi} = \frac{\delta r}{\cos \varphi} = \frac{c\tau_p}{2\kappa_c \cos \varphi}, \quad (1)$$

$$\delta l = \frac{\lambda R_r}{2VT_s \sin \Theta_r} = \frac{\lambda(h_s / \sin \varphi)}{2VT_s \sin \Theta_r}, \quad (2)$$

где  $c$ , м/сек – скорость распространения радиоволн в свободном пространстве;  $\Delta f$ , Гц – ширина спектра зондирующего сигнала;  $\varphi$ , град – угол наблюдения РСА относительно траверза спутника;  $\tau_p$ , сек – длительность импульса;  $\kappa_c$  – коэффициент сжатия импульса;  $\lambda$ , м – длина волны;  $R_r$ , м – дальность наблюдения;  $\Theta_r$ , град – угол наблюдения (при боковом обзоре  $\Theta_r = \pi/2$ );  $V$ , м/сек – средняя орбитальная скорость спутника;  $h_s$ , м – высота орбиты спутника;  $T_s$ , сек – время синтезирования апертуры.

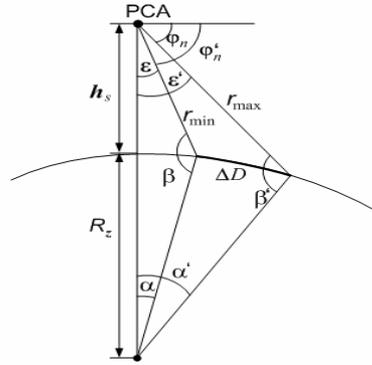


Рис. 2. Геометрия обзора подстилающей поверхности космическими PCA

В предположении, что значения  $\delta D$ ,  $\delta l$  при функционировании КА FIA Radar-1 в режиме высокого разрешения не могут быть хуже, чем его прототипов ( $\delta D = \delta l \approx 0,5 \div 1$  м при  $T_s = 6$  сек) [4], решение (1) и (2) позволяет установить зависимости  $\delta D(\varphi)$ ,  $\delta l(\varphi)$  для верхней границы разрешения и определить значение углов наблюдения  $\varepsilon_{\min}$ ,  $\varepsilon_{\max}$ , при которых выполняется это условие (рис. 3).

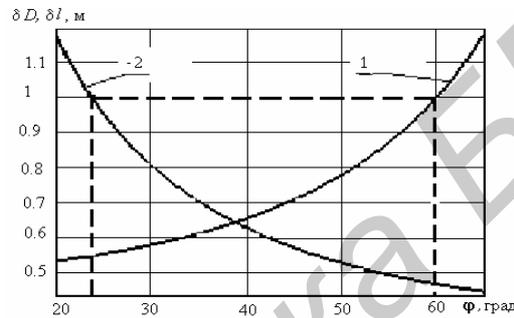


Рис. 3. Зависимость изменения разрешающей способности по горизонтальной дальности  $\delta D$  (зависимость 1) и азимуту  $\delta l$  (зависимость 2) от угла  $\varphi$

Анализ зависимостей, представленных на рис. 3, позволяет утверждать, что обзор земной поверхности PCA FIA Radar-1 без существенного ухудшения разрешающей способности возможен под углами  $\varepsilon_{\min} \approx 24^\circ$ ,  $\varepsilon_{\max} \approx 60^\circ$ .

В соответствии с рис. 2 значения  $r_{\min}$  и  $r_{\max}$ , с учетом кривизны Земли, могут быть найдены по формулам:

$$r_{\min} = \sqrt{(R_z + h_s)^2 + R_z^2 - 2R_z(R_z + h_s)\cos\alpha}, \quad (3)$$

$$r_{\max} = \sqrt{(R_z + h_s)^2 + R_z^2 - 2R_z(R_z + h_s)\cos\alpha'}, \quad (4)$$

где  $R_z \approx 6371$  км – радиус Земли.

Значения углов  $\alpha$  и  $\alpha'$  в (3) и (4) рассчитываются через промежуточные величины  $\beta$  и  $\beta'$  (рис. 2):

$$\beta = \pi - \arcsin\left(\frac{(R_z + h_s) \cdot \sin \varepsilon}{R_z}\right), \quad (5)$$

$$\beta' = \pi - \arcsin\left(\frac{(R_z + h_s) \cdot \sin \varepsilon'}{R_z}\right). \quad (6)$$

Откуда

$$\alpha = \pi - \beta - \varepsilon, \quad (7)$$

$$\alpha' = \pi - \beta' - \varepsilon'. \quad (8)$$

Подставив результаты (7), (8) в (3), (4), получим значения искомых величин.

С учетом (7), (8) размер полосы обзора РСА по дальности  $\Delta D$  можно определить как длину дуги радиусом  $R_z$ , ограниченную углом  $(\alpha' - \alpha)$  по формуле

$$\Delta D = \frac{\pi R_z (\alpha' - \alpha)}{180}. \quad (9)$$

Результаты расчетов согласно (1) – (9) представлены в таблице.

**Характеристики обзора земной поверхности спутником FIA Radar-1**

Характеристика	$\delta D$ , м	$\delta l$ , м	$\epsilon_{\min}$ , град	$\epsilon_{\max}$ , град	$\beta$ , град	$\beta'$ , град	$\alpha$ , град	$\alpha'$ , град	$r_{\min}$ , км	$r_{\max}$ , км	$\Delta D$ , км
Значение	$\leq 1$	$\leq 1$	25	60	151,4	100,8	4,6	19,2	1250	2560	1620

Однако влияние различных факторов на работу РСА не позволяют осуществлять одновременную съемку местности в пределах всей полосы обзора. К таким факторам относятся [4]:

- ошибки ориентации КА, вызывающие смещение доплеровского спектра;
- атмосферные неустойчивости и временная изменчивость объектов наблюдения, предъявляющие высокие требования к энергетическому потенциалу РСА, точности фокусирования синтезированной апертуры, радиоприемному тракту и устройствам обработки сигналов;
- высокая орбитальная скорость КА, приводящая к существенной неопределенности зондирующего сигнала по азимуту и (или) дальности (эффект миграции).

Вследствие этого радиолокационная съемка в пределах всей полосы обзора производится в трех основных режимах работы:

- телескопический (высокого разрешения  $\delta D = \delta l = 0,5 \div 1$  м);
- полосовой (среднего разрешения  $\delta D = \delta l \approx 3$  м);
- широкозахватный или картографирования (низкого разрешения  $\delta D = \delta l = 6$  м и более).

Основными характеристиками этих режимов, с точки зрения обзора земной поверхности, являются размеры полосы одновременного обзора по дальности  $\Delta d$  и азимуту  $\Delta l$ .

При определении  $\Delta d$  учитывают то, что функция неопределенности сигнала импульсной РСА с периодом повторения импульсов  $T_p$  характеризуется неоднозначностью по дальности. Это связано с возможностью приема в одном строке сигналов от предыдущих периодов зондирования. Зная интервал неоднозначности, который может быть найден через рекуррентную дальность [4], численно равную  $r_r = cT_p/2$ , можно определить размер  $\Delta d$  как

$$\Delta d = r_r / \cos \varphi.$$

Если считать, что параметры излучения РСА априорно неизвестны, то при условии бокового обзора значение  $\Delta d$  может быть вычислено через разрешающую способность по формуле [5]:

$$\Delta d = \frac{c \delta D}{4V k_d \cos \varphi \sin \varphi}, \quad (10)$$

где  $k_d = 1,2 \div 1,4$  – коэффициент запаса, определяемый допустимым уровнем сигналов неоднозначности по дальности, который рассчитывается с учетом формы диаграммы направленности антенны и пределов изменения углов наблюдения (наклонной дальности).

При расчете  $\Delta l$  необходимо учитывать величину фазовой ошибки  $\Delta \psi$ , возникающей на краях апертуры вследствие доплеровского сдвига частоты траекторного сигнала. Если считать, что при боковом обзоре ( $\Theta_r = \pi/2$ ) допустимо  $\Delta \psi = \pi/4$ , то ширина полосы обработки по азимуту, а соответственно и размер  $\Delta l$  могут быть рассчитаны по формуле [3]:

$$\Delta l = 2 R_r \sqrt{\frac{\delta l}{VT_s}}. \quad (11)$$

Результаты расчетов по формулам (10), (11) приведены на рис. 4.

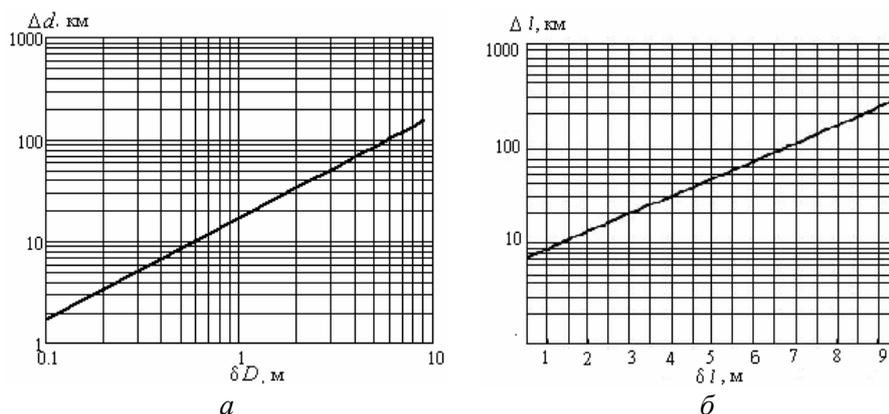


Рис. 4. Зависимости размера полосы одновременного обзора по дальности от разрешающей способности по дальности (а) и размера полосы одновременного обзора по азимуту от разрешающей способности по азимуту (б)

В случае формирования радиолокационного изображения в виде кадра использование зависимостей, приведенных на рис. 4, позволяет произвести оценку его размеров в формате  $\Delta d \times \Delta l$ . Так, при функционировании РСА спутника FIA Radar-1 в телескопическом режиме с  $\delta D = \delta l = 1$  м, размер кадра не должен превышать  $18 \times 9$  км, в режиме полосового обзора ( $\delta D = \delta l = 3$  м) –  $50 \times 20$  км, а в широкозахватном режиме ( $\delta D = \delta l = 6$  м) –  $100 \times 65$  км.

Здесь необходимо учитывать, что реальный размер антенных устройств многих космических РСА не всегда позволяет производить радиолокационную съемку в пределах всей полосы обзора. Поэтому для расширения возможностей обзора во многих космических РСА реализованы построчный, покадровый или комбинированный способы обзора. В связи с этим можно предположить, что спутник FIA Radar-1 в режиме полосового обзора способен производить съемку земной поверхности построчно, а в широкозахватном режиме – комбинированным способом. При этом протяженность радиолокационной съемки по азимуту определяется объемом памяти вычислительных устройств и скоростью передачи информации на спутник ретранслятор или непосредственно на наземный пункт обработки.

### Заключение

В ходе проведенного исследования получены оценки, характеризующие возможности спутника FIA Radar-1 по обзору подстилающей поверхности на основании данных о параметрах его орбиты. Предельные границы зоны обзора РСА могут быть рассчитаны на основании требований, предъявляемых к разрешающей способности. Для получения радиолокационных снимков с высоким разрешением, съемка земной поверхности осуществляется кадрами. При этом размер кадра  $\Delta d \times \Delta l$  не должен превышать  $18 \times 9$  км. Для ведения радиолокационной съемки земной поверхности в режимах с более низким разрешением применяется строчный и комбинированный обзор.

Полученные в ходе проведения исследования результаты могут быть использованы для разработки методик по оценке возможностей космических РСА военного и двойного назначения при организации радиотехнического контроля в целях своевременного оповещения о несанкционированном доступе к геоинформационному ресурсу государства.

# EVALUATION OF OPPORTUNITIES OF SPACE RADAR SYSTEMS FOR REMOTE SENSING OF THE EARTH ON THE EXAMPLE OF THE FIA RADAR-1 SATELLITE

V.I. GRINKEVICH, V.E. LAZARENKO

## Abstract

One approach to evaluation of opportunities of space based synthetic aperture radar for remote sensing of the earth's surface on the basis of known parameters of orbits of their platforms is described.

## Список литературы

1. Итоги запусков спутников съемки земли. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.scanex.ru.shtms>.
2. Первый «Анти-Lacrosse». [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.novosti-kosmonavtiki.ru/content/nombers/334/01.htm>.
3. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования. М., 2005.
4. Неронский Л.Б., Михайлов В.Ф., Брагин И.В. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны. СПб., 1999.
5. AGARD-LS-182. Fundamentals and Special Problems of Synthetic Aperture Radar. North Atlantic Treaty Organization. Published. Canada. 1992.