

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ  
РСА X-ДИАПАЗОНА НА БАЗЕ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

**Храмов Константин Константинович**

кандидат технических наук, доцент, декан факультета информационных технологий и радиоэлектроники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* [hramovkk@gmail.com](mailto:hramovkk@gmail.com)

**Костров Виктор Васильевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* [kostrov.46@mail.ru](mailto:kostrov.46@mail.ru)

*Адрес:* 602264, Российская Федерация, Владимирская область, г. Муром, ул. Орловская, д.23.

*Аннотация:* В статье рассмотрены вопросы оценки и обеспечения требуемых значений радиометрической чувствительности и радиометрического разрешения радиолокаторов с синтезированием апертуры (РСА) космического базирования при их работе на базе малых космических аппаратов. Приведены необходимые математические выкладки и выполнен расчёт указанных величин для РСА X-диапазона, работающих в маршрутном режиме обзора при максимальном разрешении. Проведён анализ влияния основных технических характеристик и параметров космических РСА на чувствительность и радиометрическое разрешение, оценены достижимые значения последних.

*Ключевые слова:* радиолокатор с синтезированием апертуры, РСА, малый космический аппарат, радиометрическая чувствительность, радиометрическое разрешение.

### 1. Введение

В настоящее время радиолокационные системы с синтезированием апертуры антенны (РСА) космического базирования представляют собой эффективные, надёжные и перспективные средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с достаточно широкими возможностями [1–4]. Информация, получаемая с помощью систем ДЗЗ, находит применение в следующих основных направлениях деятельности [5]:

- 1) развитие транспортной инфраструктуры и строительства;
- 2) управление природными ресурсами;
- 3) энергетика;
- 4) геоинформационные сервисы;
- 5) обеспечение судоходства и исследование океана;
- 6) мониторинг и управление чрезвычайными ситуациями;
- 7) оборонное назначение.

Вместе с тем количество космических аппаратов (КА) радиолокационного зондирования меньше числа КА оптического наблюдения [6]. Это обусловлено более жёсткими техническими требованиями и ограничениями, предъявляемыми к РСА космического базирования, а также экономическими причинами. Ограничения касаются, прежде всего, ресурсов системы энергоснабжения, мощности передатчика, размеров антенных систем, вычислительных возможностей бортовой аппаратуры, пропускной способности канала передачи информации, стоимости вывода КА на орбиту [4, 6].

В последние годы наблюдается тенденция перехода РСА землеобзора космического базирования к применению сравнительно компактных радиолокаторов на базе малых космических аппаратов (МКА) и ракет-носителей лёгкого класса [5–11]. При этом среди факторов, влияющих на эту тенденцию, можно назвать [5]:

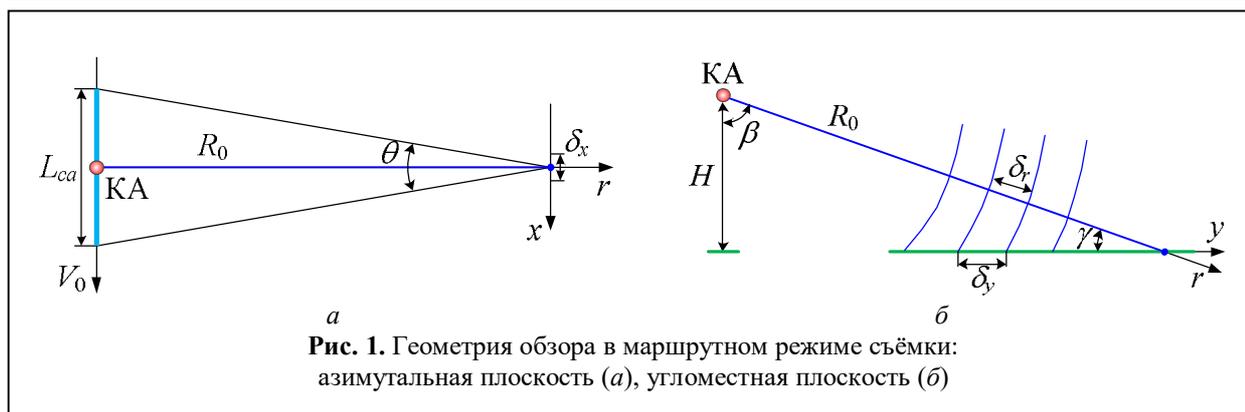


Рис. 1. Геометрия обзора в маршрутном режиме съёмки: азимутальная плоскость (а), угломестная плоскость (б)

- развитие технологий в областях микроэлектроники и аппаратуры наблюдения;
- рост предложений по средствам выведения МКА, в т.ч. по групповым запускам;
- появление и развитие концепции разработки унифицированных платформ, что позволяет снижать стоимость, увеличивать надёжность и уменьшать время изготовления МКА;
- увеличение числа задач, решаемых с помощью МКА.

Целью работы является оценка достижимой радиометрической чувствительности и радиометрического разрешения радиолокаторов с синтезированием апертуры космического базирования  $X$ -диапазона при их работе на базе малых космических аппаратов в маршрутном режиме обзора.

## 2. Постановка задачи

Радиометрическая чувствительность и радиометрическое разрешение наряду с углом визирования и используемым диапазоном длин волн относятся к основным исходным данным, используемым при расчёте проектных параметров целевой аппаратуры для РСА [4]. При этом для первой итерации расчётов в качестве начальных данных задаются высотой рабочей орбиты  $H$  и углом визирования  $\beta$ . Для космических РСА значения угла визирования находятся в пределах (20...60) градусов: при малых  $\beta$  ухудшается разрешение по горизонтальной дальности и возрастает уровень сигнала фона, а при больших — уменьшается диапа-

зон однозначного измерения дальности и ухудшается отношение сигнал-шум.

В известной литературе, например [2, 4–9, 11], имеются данные по расчёту чувствительности для частных случаев, описывающих конкретные радиолокационные системы с синтезированием апертуры. При этом практически отсутствуют обобщённые результаты, позволяющие оценить качественное и количественное влияние наиболее значимых технических характеристик и параметров РСА на их радиометрическую чувствительность и радиометрическое разрешение.

Выполним расчёты для сцены (рис. 1), содержащей носитель РСА – космический аппарат КА, движущийся по орбите с постоянной орбитальной скоростью  $V_0$  на высоте  $H$ . Визирование наблюдаемого участка местности осуществляется под углом  $\beta$ . Угол падения  $\gamma$  электромагнитной волны на этот участок (угол места) и наклонная дальность  $R_0$  зависят от значений  $H$  и  $\beta$  [1, 4, 12]. Зададимся следующими параметрами: режим съёмки — нормальный боковой обзор (угол наблюдения  $\theta_u = 90^\circ$ ), длина волны зондирующего сигнала  $\lambda = 3,14$  см ( $X$ -диапазон).

## 3. Радиометрическая чувствительность

Выражение для расчёта радиометрической чувствительности может быть получено из уравнения максимальной дальности обнаружения цели [1, 2]

$$R_0^4 = \frac{P_u \tau_u N_u G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 N_0 Q L}, \quad (1)$$

где  $P_u$  — импульсная мощность излучения;  $\tau_u$  — длительность импульсов;  $N_u = T_{ca} F_n$  — количество когерентных импульсов, излучённых за время зондирования  $T_{ca}$  (время синтеза апертуры) и следующих с частотой повторения  $F_n$ ;  $G$  — коэффициент усиления антенны;  $\sigma$  — эффективная площадь рассеяния (ЭПР) цели;  $N_0 = k_0 T_0 F_{ш}$  — спектральная плотность мощности внутреннего шума приёмника, определяемая постоянной Больцмана  $k_0 = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Вт/(Гц·К), абсолютной температурой приёмной системы  $T_0 = 290$  К и коэффициентом шума приёмника  $F_{ш}$ ;  $L$  — суммарные потери в канале распространения сигнала;  $Q$  — отношение сигнал-шум.

Для нормального бокового обзора справедливо равенство

$$N_u = \frac{\lambda R_0 F_n}{2 \delta_x V_0}, \quad (2)$$

где  $\delta_x = \lambda R_0 / (2L_{ca})$  — азимутальное разрешение РСА (по путевой дальности);  $L_{ca} = T_{ca} V_0$  — длина синтезированной апертуры (рис. 1, а).

Коэффициент усиления антенны пропорционален её площади  $S$ :

$$G = 4\pi \eta S / \lambda^2,$$

где  $\eta$  — коэффициент использования антенны.

ЭПР цели определяется выражением [1, 2]

$$\sigma = \sigma_0 \delta_x \delta_y = \frac{\sigma_0 \delta_x \delta_r}{\cos \gamma}, \quad (3)$$

где  $\sigma_0$  — удельная ЭПР наблюдаемого участка местности;  $\delta_y = \frac{\delta_r}{\cos \gamma} = \frac{c \cdot \tau_{сж}}{2 \cos \gamma}$  — разрешение РСА по горизонтальной дальности (рис. 1, б);  $\delta_r$  — разрешение по наклонной дальности;  $c$  — скорость света;  $\tau_{сж} = \tau_u / k_{сж}$  — длительность сжатого импульса.

Чувствительность РСА, характеризующая влияние шумов приёмника, определяется значением минимальной удельной ЭПР фона местности, которое создаёт на выходе синтезированного РЛИ мощность, равную мощности шумов приёмника. Поэтому этот параметр называют также удельной ЭПР шумового эквивалента  $\sigma_0^{ne}$  [1, 2, 5, 13].

Подставив формулы (2)–(3) в уравнение (1) и, учитывая, что при значении  $\sigma_0 = \sigma_0^{ne}$  и отсутствии некогерентного накопления отношение сигнал-шум на выходе РСА  $Q = 0$  дБ, можно записать выражение для чувствительности РСА (удельной ЭПР шумового эквивалента):

$$\sigma_0^{ne} = \frac{8\pi \lambda R_0^3 N_0 L V_0 \cos \gamma}{P_{cp} \eta^2 S^2 \delta_r} = \frac{32\pi^2 R_0^3 k_0 T_0 F_{ш} L V_0}{P_{cp} \lambda G \eta S \delta_y}, \quad (4)$$

где  $P_{cp} = P_u \tau_u F_n$  — средняя мощность излучения.

Выполним расчёт чувствительности РСА  $X$ -диапазона, работающего в маршрутном режиме обзора при максимальном разрешении, с параметрами, характерными для малых космических аппаратов [5–11] (таблица 1).

Графики чувствительности, полученные при изменении пространственного разрешения  $\delta = \delta_x = \delta_y$  для различных значений высоты орбиты  $H$  космического аппарата, приведены на рис. 2. Из полученных зависимостей, а также непосредственно из выражения (4) очевидно, что повышение разрешающей способности РСА и уменьшение мощности зондирующего сигнала приводят к пропорциональному ухудшению чувствительности системы. Повышение высоты орбиты КА также приводит к ухудшению значения  $\sigma_0^{ne}$  за счёт снижения орбитальной скорости носителя РСА, однако эта зависимость не является линейной. Как следует из приведённых на рис. 2 графиков при использовании маршрутного режима съёмки в РСА на базе МКА с реализуемыми в настоящее время величинами  $\delta$ ,  $H$ ,  $P_u$  [5–9] и параметрами, приведёнными в таблице 1,

Таблица 1. Параметры РСА при моделировании

Параметр	Значение
Высота орбиты космического аппарата $H$ , км	550...650
Длина волны $\lambda$ , см	3,14 (X-диапазон)
Угол визирования $\beta$ , градусы	45
Импульсная мощность излучения $P_u$ , Вт	800...1200
Длительность импульсов, $\tau_u$ , мкс	20
Сквозность импульсов $q$	4
Площадь антенны $S$ , м <sup>2</sup>	10
Коэффициент использования антенны $\eta$	0,6
Коэффициент шума приёмника $F_{ш}$ , дБ	3
Суммарные потери в канале распространения $L$ , дБ	5

достижимые значения чувствительности лежат в пределах  $\sigma_0^{ne} = (-22... -25)$  дБ.

Стремление разработчиков РСА космического базирования минимизировать размеры антенных систем, обеспечив при этом требуемые технические характеристики и параметры радиолокатора, входит в противоречие, в том числе, с тем, что чувствительность РСА снижается обратно пропорционально квадрату площади антенны (рис. 3). Приведённые на этом рисунке зависимости соответствуют параметрам, представленным в таблице 1, при значении импульсной мощности излучения  $P_u = 800$  Вт. При реализации РСА на базе МКА значения площади антенны обычно не превы-

шают  $(3,5...4,5) \text{ м}^2$  [8, 11]. Поэтому в маршрутном режиме при пространственном разрешении  $\delta = 3$  м чувствительность РСА ограничена величинами  $\sigma_0^{ne} = (-13... -16)$  дБ (рис. 3, а). Повышение разрешающей способности РСА без изменения площади антенны приведёт к пропорциональному снижению радиометрической чувствительности (рис. 3, б).

На чувствительность РСА также оказывает значительное влияние угол визирования  $\beta$ , который для постоянного значения высоты  $H$  орбиты КА определяет наклонную дальность  $R_0$  до снимаемого участка земной поверхности и угол падения волны  $\gamma$  на этот участок. Зависимости чувствительности РСА от изменения

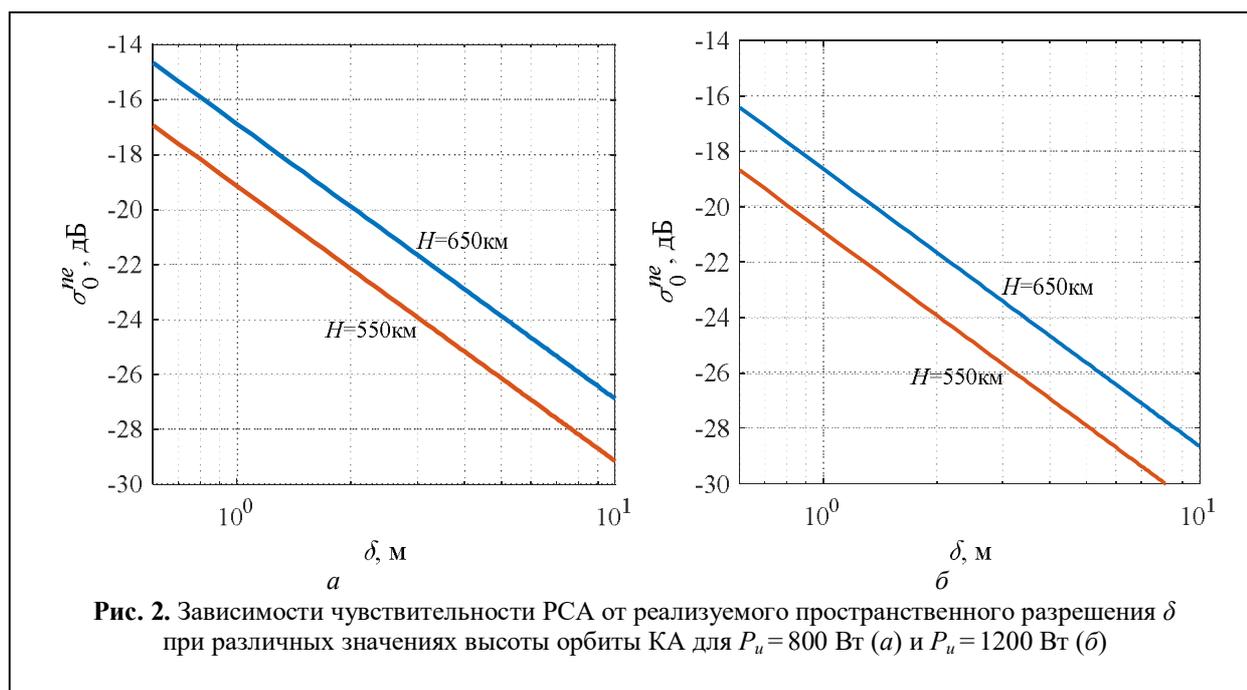


Рис. 2. Зависимости чувствительности РСА от реализуемого пространственного разрешения  $\delta$  при различных значениях высоты орбиты КА для  $P_u = 800$  Вт (а) и  $P_u = 1200$  Вт (б)

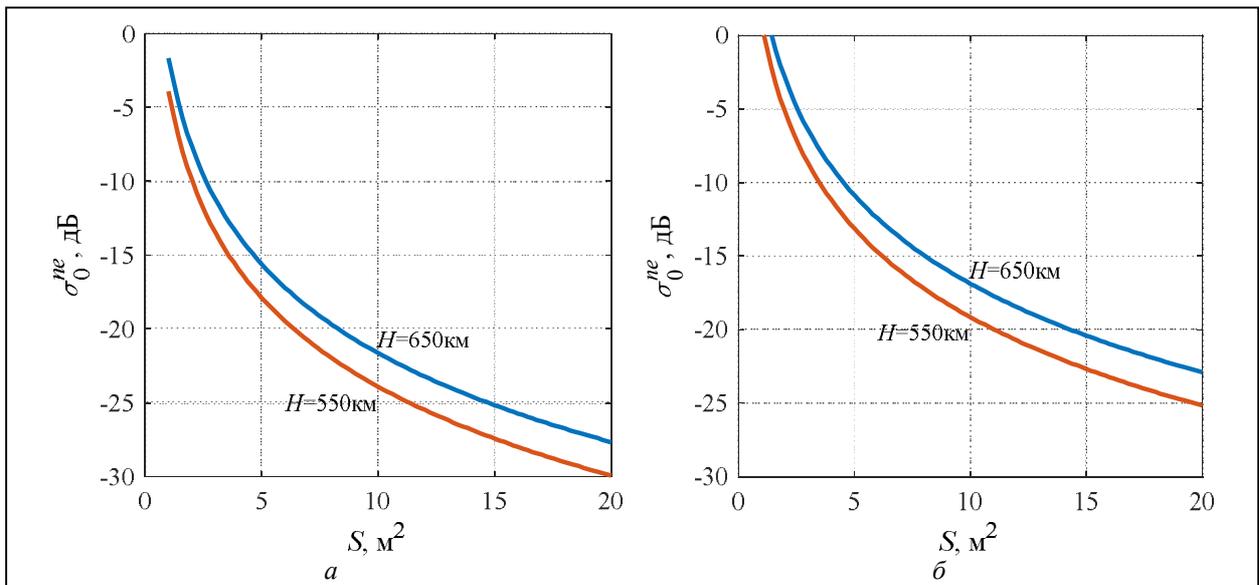


Рис. 3. Зависимости чувствительности РСА от площади  $S$  антенны при различных значениях высоты орбиты КА для  $\delta = 3$  м (а) и  $\delta = 1$  м (б)

угла визирования приведены на рис. 4. Они построены для маршрутного режима съёмки при двух значениях пространственного разрешения (1 м и 3 м) и  $H = 550$  км. Из этих графиков следует, что при неизменном значении  $\delta$  увеличение угла визирования приводит к снижению чувствительности РСА, что связано с уменьшением уровня отражённого сигнала. Эта зависимость является нелинейной, причём при больших углах визирования большинство

наблюдаемых пространственно-распределённых объектов становятся неотличимыми от шума, поэтому использование в МКА углов визирования больше (55...60) градусов является нецелесообразным. Более того, при угле визирования, определяемом выражением

$$\beta_{кр} = \arcsin\left(\frac{R_3}{R_3 + H}\right),$$

где  $R_3$  — радиус Земли, работа РСА становится

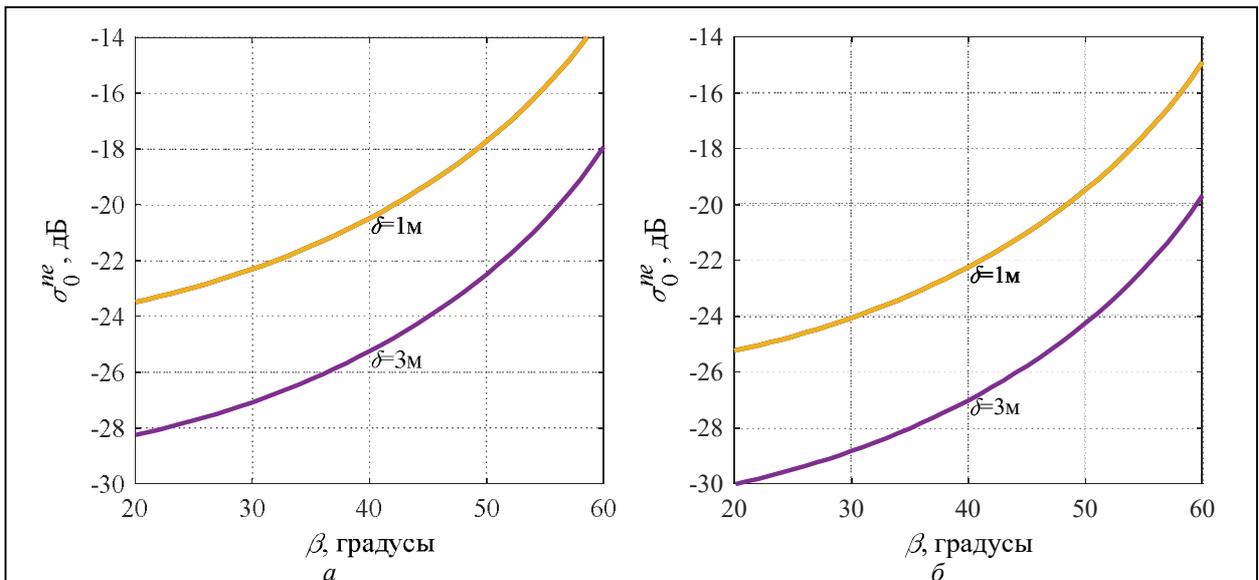
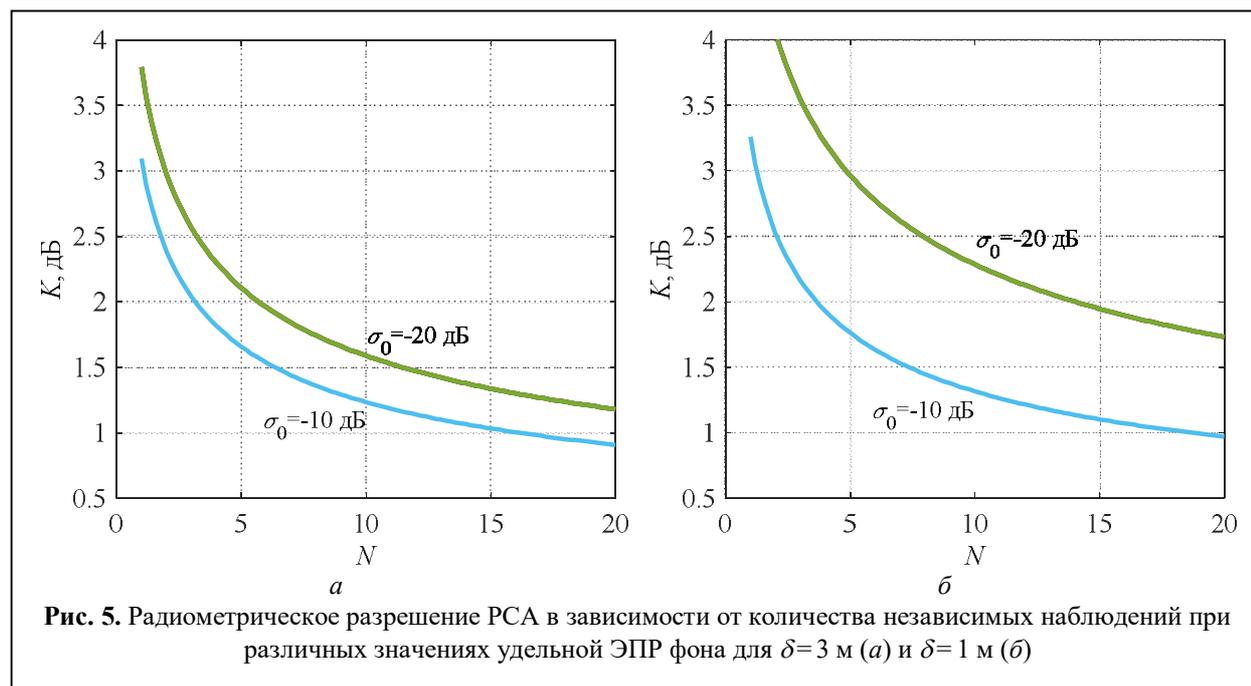


Рис. 4. Зависимости чувствительности РСА от угла визирования  $\beta$  при различных значениях пространственного разрешения для  $P_u = 800$  Вт (а) и  $P_u = 1200$  Вт (б)



ся невозможной. Для рассматриваемой высоты орбиты  $H = 550$  км это значение составляет  $\beta_{кр} = 67^\circ$ .

Добавим, что при фиксированном угле визирования  $\beta$  уменьшение мощности зондирующих радиоимпульсов и повышение пространственного разрешения пропорционально уменьшают чувствительность РСА (рис. 4, б).

#### 4. Радиометрическое разрешение

Радиометрическое разрешение характеризует возможность различения объектов, отличающихся значениями удельной ЭПР [1, 3–5, 13]. При дешифрировании радиолокационных изображений повышение точности измерений и вероятности различения контрастов между участками может быть достигнуто за счёт увеличения количества независимых наблюдений путём усреднения отсчётов по площади наблюдаемого участка (межэлементное некогерентное накопление) или путём накопления различных разновременных изображений (внутриэлементное некогерентное накопление) [1].

Радиометрическое разрешение, выраженное в децибелах, можно вычислить по формуле [1, 4, 5]:

$$K = 10 \cdot \lg \left[ 1 + \frac{1}{\sqrt{N}} \left( 1 + \frac{\sigma_0^{ne}}{\sigma_0} \right) \right], \quad (5)$$

где  $N$  – количество независимых наблюдений, накапливаемых в элементе разрешения РСА.

Графики радиометрического разрешения РСА, построенные по выражениям (4)-(5) при значении импульсной мощности излучения  $P_u = 800$  Вт как функции количества независимых наблюдений для различных значений пространственного разрешения и удельной ЭПР фона, приведены на рис. 5.

Данные функциональные зависимости позволяют определить необходимое число некогерентных накоплений для обеспечения требуемого значения радиометрического разрешения. При этом происходит обмен пространственного разрешения на радиометрическое. В современных РСА при наличии высокопроизводительных систем обработки такой обмен выполняется, как правило, за счёт использования межэлементного некогерентного накопления по площади наблюдаемого объекта [1].

#### 5. Заключение

Таким образом, полученные в работе зависимости позволяют провести качественный и ко-

личественный анализ влияния основных технических характеристик космических РСА, работающих на базе МКА в маршрутном режиме обзора, на чувствительность  $\sigma_0^{ne}$  и радиометрическое разрешение  $K$  — параметры, определяющие ошибки измерения контраста и точность оценки удельной ЭПР объектов.

#### Литература

1. *Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турок В.Э.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. *В.С. Вербы*. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
2. *Skolnik, Merrill I.* “Radar Handbook” – 3rd revised edition. New York: McGraw Hill, 2008. 1351 p.
3. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. *Л.А. Школьного*. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 531 с.
4. *Костров В.В., Толстов Е.Ф.* Проблемы дистанционного зондирования Земли с использованием космических РСА высокого разрешения // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн: Конспекты лекций / VII Всероссийские Армандовские чтения: молод. школа. Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ. 2017. С. 76–113.
5. Современные подходы к созданию малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на базе унифицированных платформ: монография / *С.Л. Сафронов* [и др.]; под ред. засл. деятеля науки РФ, д-ра техн. наук, проф. *В.В. Салмина*. Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. 276 с.
6. *Голов Н.А., Усачев В.А., Корянов В.В., Топорков А.Г.* Перспективные технологии создания космического комплекса радиолокационного зондирования Земли на базе малых космических аппаратов и ракет-носителей лёгкого класса // Инженерный журнал: наука и инновации. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2019. №5. С. 1–20.
7. *Вютченко С.Л., Коваленко А.И., Рима В.В., Смирнов С.Н., Шишанов А.В.* Возможности создания широкозахватных радиолокаторов с синтезированной апертурой для малых космических аппаратов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2013. Т.134. № 3. С. 21–26.
8. *Hirako K., Shirasaka S., Obata T., Nakasuka S., Saito H., Nakamura S., Tohara T.* Development of small satellite for X-Band compact synthetic aperture radar // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Pp. 1–9. DOI: 10.1088/1742-6596/1130/1/012013.
9. *H. Saito et al.* Compact X-Band Synthetic Aperture Radar for 100kg Class Satellite // IEICE Transactions on Communications. 2017. Vol. E100.B. Iss. 9. Pp. 1653–1660. DOI:10.1587/transcom.2016PFI0008.
10. *Костров В.В., Григас С.Э., Скорынин А.А., Терехов Ю.Е.* Энергетическое обеспечение радиолокационных комплексов космического базирования для обнаружения летательных аппаратов // Проектирование и технология электронных средств. 2015. № 3. С. 44–51.
11. *Freeman A.* Design Principles for Smallsat SARs // 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2018, Logan, UT, 2018.
12. *Храмов К.К., Костров В.В.* Моделирование радиолокационных изображений РСА космического базирования в режиме обнаружения воздушных целей // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 14-ой международной научно-технической конференции / Владим. гос. университет; редкол.: А.Г. Самойлов (и др). Владимир: ВлГУ. 2021. С. 243–246.
13. *Захаров В.Д., Лепёхина Т.А., Николаев В.И., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Четверик В.Н.* Проблемы оценки пространственного и радиометрического разрешения РСА // Изв. вузов. Электроника. 2012. №6 (98). С. 65–72.

Поступила 12 мая 2022 г.

English

## ENSURING SENSITIVITY AND RADIOMETRIC RESOLUTION OF X-RANGE SAR ON THE BASIS OF SMALL-SIZE SPACECRAFTS

**Konstantin Konstantinovich Khramov** — PhD, the Head of Department of information technology and radio electronics, Murom Institute (branch) “Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs”.

E-mail: [hramovkk@gmail.com](mailto:hramovkk@gmail.com)

**Victor Vasilyevich Kostrov** — Grand Dr. in Engineering, Professor of Radio Engineering Department, Murom Institute (branch) “Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs”.

E-mail: [vyk@mit.ru](mailto:vyk@mit.ru)

Address: 602264, Russian Federation, Vladimir Region, Murom, Orlovskaya st., 23.

**Abstract:** The article examines issues of evaluating and ensuring the required values of radiometric sensitivity and radiometric resolution of space-based synthetic aperture radar (SAR). These parameters during SAR operation based on small-size spacecrafts are critical, since the resource of power supply system is limited. There arises a technical contradiction between radiometric properties and other SAR parameters. The article's purpose is to estimate attainable radiometric sensitivity and radiometric resolution of space-based SAR when operating within limitation in emitting power and antenna system size. That's why the article's matter is relevant. The spacecraft is assumed to have a circular orbit and 550...650 km altitude. A normal lateral visibility (en-route mode) is under consideration, which is performed by space-based X-range SAR. The necessary mathematical manipulations are presented and SAR sensitivity calculations are made (noise equivalent of the specific effective area of dispersion) and calculations of radiometric sensitivity at maximum spatial resolution were made as well. The effect of major technical properties and parameters of space-based SAR was analyzed in respect to sensitivity and radiometric resolution and available values of the latter were estimated. Particular emphasis is made on the research of the effect of antenna's effective aperture area on radiometric sensitivity. The obtained analysis results and functional dependencies enable to define boundaries of potentially available radiometric sensitivity considering limitations in transmitter power and antenna dimensions. It is demonstrated that if non-coherent integration is applied to ensure the required radiometric resolution value, then there is an exchange of spatial resolution for radiometric one, and the required number of integrations depends on the primary resolution. Such an exchange is made in current SAR if high-performance processing systems are available and, as a rule, through inter-element integration along the area of the object under observation.

**Keywords:** synthetic aperture radar, radar, small spacecraft, radiometric sensitivity, radiometric resolution.

#### References

1. Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk E.G. Space-based ground survey radar systems. Ed. by S. Verba. Moscow: Radiotekhnika, 2010. 680 p.
2. Skolnik, Merrill I. "Radar Handbook" – 3rd revised edition. New York: McGraw Hill, 2008. 1351 p.
3. Air reconnaissance radar systems radar image interpretation / Ed. by L.A. Shkolny. Moscow: Zhukovsky AFEA, 2008. 531 p.
4. Kostrov V.V., Tolstov E.F. Problems of remote sensing of the Earth using high-resolution space-borne SAR. VII Armand Science Conference. 2017. Pp. 76–113.
5. S.L. Safronov et al. Modern approaches to the creation of small spacecraft for remote sensing of the Earth based on unified platforms: monograph. Ed. by prof. V.V. Salmin. Samara: Samara State University, 2019. 276 p.
6. Golov N.A., Usachev V.A., Koryanov V.V., Toporkov A.G. Promising technical solutions for the space complex of the Earth's radar sensing based on small spacecraft and light-class launch vehicles. Engineering Journal: Science and Innovation. 2019. No. 5. Pp. 1–20.
7. Vnotchenko S.L., Kovalenko A.I., Riman V.V., Smirnov S.N., Shishanov A.V. Possibilities of creating wide coverage synthetic aperture radars for small spacecraft. Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEEM. 2013. Vol. 134. No. 3. Pp. 21–26.
8. Hirako K., Shirasaka S., Obata T., Nakasuka S., Saito H., Nakamura S., Tohara T. Development of small satellite for X-Band compact synthetic aperture radar. Journal of Physics: Conference Series. 2018. Pp. 1–9. DOI: 10.1088/1742-6596/1130/1/012013.
9. H. Saito et al. Compact X-Band Synthetic Aperture Radar for 100kg Class Satellite. IEICE Transactions on Communications. 2017. Vol. E100.B. Iss. 9. Pp. 1653–1660. DOI:10.1587/transcom.2016PFI0008.
10. Kostrov V.V., Grigas S.E., Skorynin A.A., Terekhov Yu.E. Energy supply of space-based radar complexes for the detection of aircraft. Design and technology of electronic means. 2015. No. 3. Pp. 44–51.
11. Freeman A. Design Principles for Smallsat SARs. 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2018, Logan, UT, 2018.
12. Khramov K.K., Kostrov V.V. Simulation of radar images of space-borne SAR in air target detection mode. Perspective technology in means of information transfer, PTMIT-2021. Vladimir: Vladimir State University, 2021. Pp. 243–246.
13. Lepyokhina T.A., Nikolaev V.I., Titov M.P., Tolstov E.F., Chetverik V.N. Problems of estimating the spatial and radiometric resolution of SAR. Izvestiya vuzov. Elektronika. 2012. No. 6. Pp. 65–72.