

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.396.969

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-72-80>

Определение пространственной разрешающей способности на радиолокационных изображениях при дистанционном зондировании Земли

С. Н. Гусев , С. В. Журавлев, А. В. Попов

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского,
Санкт-Петербург, Россия

 vka@mil.ru

Аннотация

Введение. Анализ современного состояния и перспектив совершенствования средств радиолокационного наблюдения космического базирования позволяет определить задачи, которые могут решаться этими средствами в глобальной аэрокосмической информационной системе, обеспечивающей мониторинг воздушного и космического пространства, а также земной поверхности. Получаемая информация может использоваться для анализа результатов хозяйственной деятельности, экологического состояния окружающей среды, поиска полезных ископаемых, мониторинга чрезвычайных ситуаций, обнаружения и распознавания заданных объектов на море и суше, а также для обеспечения национальной безопасности. В связи с этим часто возникает необходимость использовать методы предварительной аналитической оценки разрешающей возможности для вновь разрабатываемых высокодетальных бортовых радиолокационных комплексов, предназначенных для установки на космических аппаратах, с учетом их основных технических характеристик, параметров движения космического аппарата и влияния состояния атмосферы. Для априорного определения значений пространственной разрешающей способности требуется разработать методику расчета значений соответствующих показателей, которые должны удовлетворять требуемому качеству получаемых радиолокационных изображений после их синтеза.

Цель работы. Создание математических зависимостей и логических правил, позволяющих производить специальные расчеты для априорного оценивания пространственной разрешающей способности радиолокационных изображений, планируемых к получению с помощью бортовой аппаратуры радиолокационного комплекса.

Материалы и методы. Используются аналитические методы определения оценки погрешности разрешающей способности бортовых радиолокационных комплексов с синтезированной апертурой в боковом (азимутальном) направлении и по дальности, а также теория обработки радиолокационных сигналов.

Результаты. Практические эксперименты по оценке разрешающей способности, проведенные на действующем радиолокационном комплексе, с целью сравнения с данными, полученными аналитическим путем, подтвердили правильность расчетов на основе предложенной методики. С помощью разработанной методики определены порядок и содержание расчета погрешности оценки разрешающей способности в азимутальном направлении и по дальности.

Заключение. Представленная методика позволяет целенаправленно конструировать новые или проводить сравнительный анализ существующих радиолокационных комплексов, в зависимости от требований по разрешающей способности.

Ключевые слова: радиолокационный комплекс, геолокация, дистанционное зондирование, сканирование поверхности, радиолокационное изображение, высокодетальная информация, разрешающая способность, погрешность оценки

Для цитирования: Гусев С. Н., Журавлев С. В., Попов А. В. Определение пространственной разрешающей способности на радиолокационных изображениях при дистанционном зондировании Земли // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 3. С. 72–80. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-72-80

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 05.04.2021; принята к публикации после рецензирования 29.04.2021; опубликована онлайн 29.06.2021



Determination of the Spatial Resolution of Radar Images in Remote Sensing of the Earth

Sergey N. Gusev , Sergey V. Zhuravlev, Anatolij V. Popov

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St Petersburg, Russia

 vka@mil.ru

Abstract

Introduction. The analysis of the current state and prospects of space-based radar surveillance tools is important for determining their functions in global aerospace information systems, which aim to monitor air and space, as well as the Earth's surface. Radar surveillance information is used for the purposes of economic analysis, environmental monitoring, mineral search, emergency monitoring, detection and recognition of specified objects at sea and on land, as well as for ensuring national security. In this regard, it is of relevance to develop methods for preliminary assessment of the resolution capacity of novel high-precision onboard radar systems installed on a spacecraft, considering their main technical characteristics, the parameters of the spacecraft movement and the influence of the atmosphere. A priori estimation of spatial resolution values requires a method for calculating the corresponding indicators meeting the required quality of the synthesized radio holograms.

Aim. To derive mathematical dependencies and logical rules allowing a priori estimation of the spatial resolution of radar images obtained by the onboard equipment of a radar complex.

Materials and methods. Analytical methods were used to determine the resolution error of onboard radar systems with a synthesized aperture in the lateral (azimuthal) direction and range, as well as the theory of radar signal processing.

Results. A comparison of the experimental and analytical data on the resolution capacity of an actual radar system confirmed the validity on the proposed method. The developed methodology was used to determine the procedure of calculating the error when estimating the resolution capacity in terms of azimuth and range.

Conclusion. The proposed method can be used for both designing novel radar systems and comparing existing radar complexes, depending on the resolution requirements.

Keywords: radar complex, geolocation, remote sensing, surface scanning, radar image, high-precision information, resolution, estimation error

For citation: Gusev S. N., Zhuravlev S. V., Popov A. V. Determination of the Spatial Resolution of Radar Images in Remote Sensing of the Earth. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 3, pp. 72–80. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-72-80

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 05.04.2021; accepted 29.04.2021; published online 29.06.2021

Введение. Дистанционное зондирование поверхности Земли (ДЗЗ) с применением различных бесконтактных способов получения информации осуществляется с различных носителей, к которым следует в первую очередь отнести летательные и космические аппараты (КА). Наиболее перспективным способом получения высокодетальной информации об объектах природного или искусственного происхождения, расположенных на земной поверхности, является использование радиолокационного сканирования заданного участка поверхности. Полученные данные могут быть полезны в различных областях деятельности: карто-

графии, геодезии, глобального экологического мониторинга, в чрезвычайных ситуациях при поиске и идентификации различных объектов на больших территориях, а также при решении отдельных задач в интересах обороны страны.

Перед разработкой или применением высокодетального радиолокационного комплекса (ВРЛК) целесообразно провести предварительные оценки пространственной разрешающей способности радиолокационных изображений (РЛИ), которые планируется получать с его помощью, с учетом влияния на разрешающую способность ВРЛК параметров атмосферы.

Определение пространственной разрешающей способности на радиолокационных изображениях при дистанционном зондировании Земли

Determination of the Spatial Resolution of Radar Images in Remote Sensing of the Earth

Под пространственной разрешающей способностью (разрешение на местности, разрешение пространственное) понимается характеристика качества РЛИ, которая определяет размер наименьшего объекта отражающей поверхности, который может быть отделен от окружающих его объектов, отличающихся по интенсивности (радиояркости) на величину, не меньшую радиометрического разрешения. Значения параметров объектов оценивания носят стохастический характер.

При определении пространственной разрешающей способности необходимо учесть особенности функционирования ВРЛК, основу конструкции которого составляет радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА) [1], размещенный на КА, находящемся на околоземной орбите.

Одно из основных свойств РЛС с РСА – постоянство линейной разрешающей способности на сформированном изображении в боковом (азимутальном) направлении, при этом угловая разрешающая способность в указанном направлении непостоянна для различных дальностей. Поэтому при оценивании разрешающей способности РЛИ определяются два основных параметра изображения: разрешающая способность в азимутальном направлении Δx и разрешающая способность по дальности Δr .

Определение априорной оценки этих параметров выполнено расчетным методом с учетом отдельных особенностей функционирования ВРЛК.

Методы. При разработке алгоритмов расчета разрешающей способности выбрана модель радиолокационного наблюдения земной поверхности ВРЛК в визирной системе координат, геометрическое представление которой отображено на рис. 1, где обозначены: A – точка прицеливания; Q – точка надира; H – высота орбиты КА – носителя ВРЛК; R – наклонная дальность до объекта съемки, отсчитываемая от фазового центра антенны РСА; L – горизонтальная дальность от точки надира до центра объекта съемки по поверхности Земли; v_a – скорость следа луча активной фазированной антенной решеткой (АФАР) на поверхности Земли; v_o – орбитальная скорость КА; θ_y – ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) в угломестной плоскости; β_B – угол визирования; γ – угол скольжения, измеряемый в угломестной плоскости между линией визирования луча АФАР OA и касательной линией; η – угол падения; $\pm\Delta\beta$ – сектор углов электронного сканирования в угломестной плоскости.

Начало визирной системы координат совпадает с фазовым центром АФАР (точка O). Ось Ox_B параллельна направлению вектора скорости КА v_o в гринвичской системе координат. Ось Oz_B направлена по нормали к плоскости АФАР в сторону излучения сигнала. Оси Ox_B и Oy_B лежат

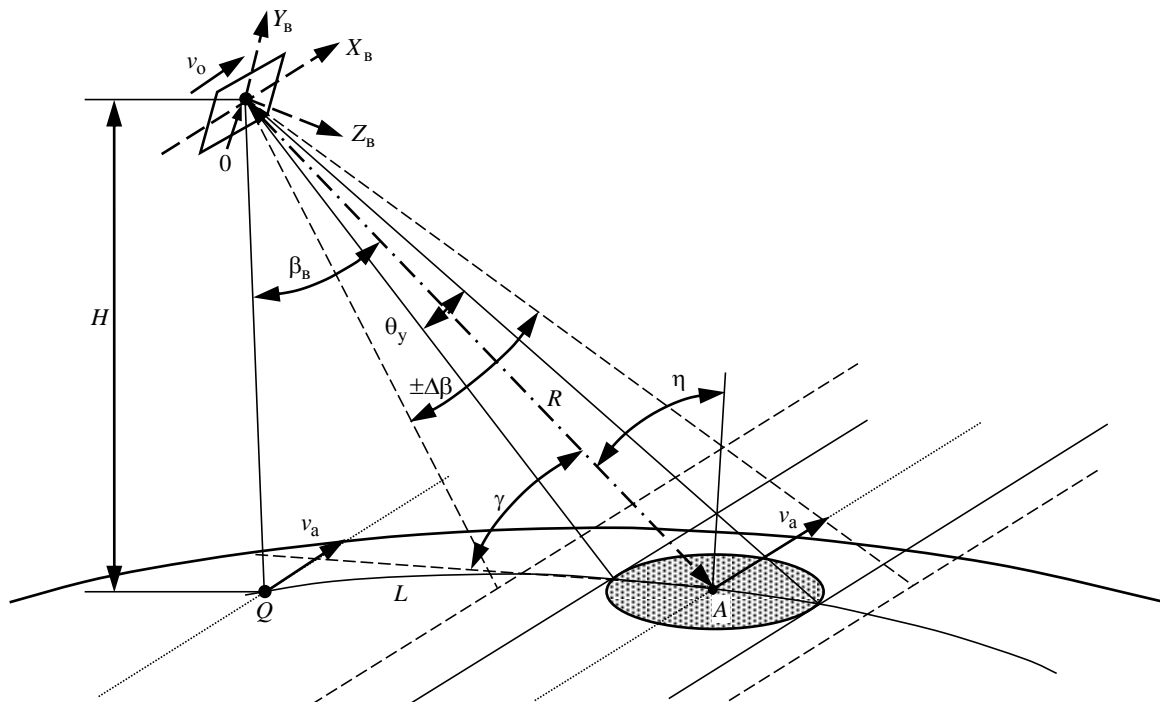


Рис. 1. Общая схема радиолокационной съемки в визирной системе координат

Fig. 1. A general scheme of radar shooting in the sighting coordinate system

в плоскости АФАР. Ось OY_B дополняет систему координат АФАР до правой. Плоскость OAQ является плоскостью визирования.

В начале съемки объект A наблюдается под углом β_B к линии проекции ВРЛК на поверхность Земли. В течение съемки этот угол может изменяться в пределах сектора сканирования $\pm\Delta\beta$.

Разработанная модель позволяет в результате расчетов определить для объекта зондирования априорные оценки разрешающих способностей в азимутальном направлении Δx и по дальности Δr .

Оценки представлены в виде результатов расчетов в числовом виде.

Специфика создания метода расчета априорной оценки пространственной разрешающей способности заключается в определении функциональной зависимости между искомыми величинами и исходными данными (моделью движения носителя РСА, геометрией съемки, режимом и параметрами съемки, параметрами зондирующего сигнала, параметрами Земли). Таким образом, расчет погрешностей оценок $\xi[\Delta x]$ и $\xi[\Delta r]$ сводится к задаче вычисления погрешностей косвенных измерений.

При создании метода расчета использовались общепринятые апробированные теоретические положения и математические методы, описывающие принципы построения и функционирования РСА с общепринятой структурой космического базирования [1–3].

Алгоритм расчета оценок геометрических параметров радиолокационных изображений состоит в следующем.

1. Определение коэффициента сферичности [5]:

$$k_{\text{сф}} = \frac{R_3 + H}{R_3 \cos \alpha},$$

где R_3 – средний радиус Земли; α – центральный угол (рис. 2, Ц – центр Земли).

2. Определение коэффициента расширения импульса $k_{\text{вес}}$, связанного с применением взвешивающих фильтров в тракте обработки радиолокационных данных. Типовые применяемые весовые функции и соответствующие значения коэффициентов расширения импульса приведены в табл. 1 [6].

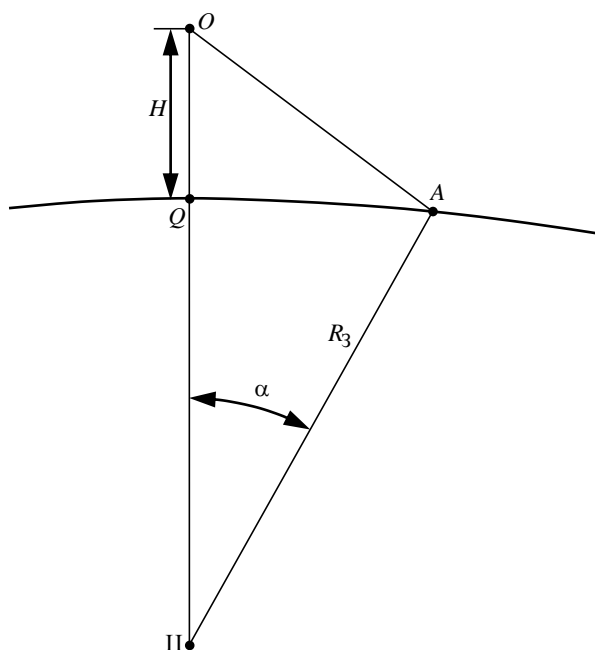


Рис. 2. Определение коэффициента сферичности
 Fig. 2. Determination of the sphericity coefficient

Табл. 1. Значения коэффициента расширения импульса $k_{\text{вес}}$
 Table 1. Values of the pulse expansion coefficient $k_{\text{вес}}$

Типовые весовые функции	$k_{\text{вес}}$
Без учета взвешивающих фильтров	1.00
Дольфа–Чебышева	1.35
Хемминга	1.47
Косинус в квадрате	1.62
Косинус в кубе	1.87

3. Определение коэффициента тропосферной погрешности [5]:

$$k_{\text{тр}} = 1 + 0.002277 \times \frac{\left[p_{\text{атм}} + (1235/T + 0.05)e - \text{tg}^2(\beta_B + 0.5\theta_y) \right]}{R_d(\beta_B + 0.5\theta_y) \cos(\beta_B + 0.5\theta_y)},$$

где $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление; T – температура атмосферы в точке проведения съемки; e – давление водяных паров; R_d – наклонная дальность, рассчитываемая от фазового центра антенны РСА до дальней границы полосы обзора как функция от параметров β_B и θ_y .

4. Определение угла падения с использованием выражения [5]

$$\eta = \arcsin \left(\frac{R_3 + H}{R_3} \sin \beta_B \right).$$

5. Определение разрешающей способности по дальности. Для сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [7, 8] она проводится в соответствии с выражением [3–6]

$$\Delta r = \frac{k_{\text{вес}} c}{2\Delta F \sin(\eta - 0.5\theta_y)}, \quad (1)$$

где c – скорость света; ΔF – девиация частоты ЛЧМ-сигнала.

Для сигнала с фазокодовой модуляцией (ФКМ) [5]

$$\Delta r = \frac{k_{\text{вес}} c}{2\Delta F_T \sin(\eta - 0.5\theta_y)}, \quad (2)$$

где F_T – тактовая частота ФКМ-сигнала.

6. Расчет коэффициента ухудшения разрешающей способности $k_{\text{парц}}$ (для режима обзорной съемки и режима наблюдения морских объектов [9, 10]), обусловленного уменьшением времени синтеза апертуры при реализации режимов несколькими парциальными лучами, в соответствии с выражением [5]

$$k_{\text{парц}} = 1 + \frac{K_R^I - 1}{K_R - 1},$$

где $K_R = \frac{\sum_{i=2}^n R_i}{R_1}$ – коэффициент, учитывающий

увеличение наклонной дальности при переходе от i -й к $(i+1)$ -й парциальной полосе обзора; I – количество парциальных полос; R_i – наклонная дальность, рассчитываемая от фазового центра антенны РСА до центра i -й парциальной полосы.

7. Расчет разрешающей способности в азимутальном направлении проводится в соответствии с выражениями:

– для детального и маршрутного режимов [5]:

$$\Delta x = \frac{\lambda R_i (\beta_B + 0.5\theta_y)}{2k_{\text{сф}} v_o t_H k_{\text{тр}}}, \quad (3)$$

где λ – длина волны зондирующего сигнала; v_o – орбитальная скорость КА – носителя ВРЛК; t_H – время синтезирования;

– для режимов обзорной съемки и наблюдения объектов на водной и равнинной поверхностях [3, 5]:

$$\Delta x = \frac{\lambda R (\beta_B + 0.5\theta_y) k_{\text{парц}}}{2k_{\text{сф}} v_o t_H k_{\text{тр}}}. \quad (4)$$

8. Из (1) и (2) определяются производные по параметрам $\Delta F_{\text{эф}}$ или ΔF_T , η , θ_y и $k_{\text{вес}}$:

$$\begin{aligned} K_{r1} &= \frac{\partial(\Delta r)}{\partial(\Delta f)} = -\frac{ck_{\text{вес}}}{\Delta f^2 \sin(\eta - 0.5\theta_y)}; \\ K_{r2} &= \frac{\partial(\Delta r)}{\partial\eta} = \frac{ck_{\text{вес}} \cos(\eta - 0.5\theta_y)}{2\Delta f \sin^2(\eta - 0.5\theta_y)}; \\ K_{r3} &= \frac{\partial(\Delta r)}{\partial(\theta_y)} = -\frac{ck_{\text{вес}} \cos(\eta - 0.5\theta_y)}{4\Delta f \sin^2(\eta - 0.5\theta_y)}; \\ K_{r4} &= \frac{\partial(\Delta r)}{\partial k_{\text{вес}}} = \frac{c}{2\Delta f \sin(\eta - 0.5\theta_y)}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Delta f = \Delta F_{\text{эф}}$ – для ЛЧМ-сигнала; $\Delta f = \Delta F_T$ – для сигнала с фазокодовой модуляцией.

9. Используя (5) и учитывая взаимную независимость ошибок определения параметров, получим формулу для вычисления суммарной погрешности разрешающей способности по дальности [5]:

$$\xi[\Delta r] = \left[K_{r1}^2 \xi^2(\Delta f) + K_{r2}^2 \xi^2(\eta) + K_{r3}^2 \xi^2(\theta_y) + K_{r4}^2 \xi^2(k_{\text{вес}}) \right]^{0.5},$$

где $\xi(*)$ – погрешность определения параметра "*" .

10. Из (3) и (4) определяются частные производные [11] по параметрам λ , R , v_o и t_H :

$$\begin{aligned} K_{x1} &= \frac{\partial(\Delta x)}{\partial\lambda} = -\frac{R(\beta_B + 0.5\theta_y)}{2k_{\text{сф}} v_o t_H k_{\text{тр}}}; \\ K_{x2} &= \frac{\partial(\Delta x)}{\partial R} = -\frac{\lambda}{2k_{\text{сф}} v_o t_H k_{\text{тр}}}; \\ K_{x3} &= \frac{\partial(\Delta x)}{\partial v_o} = -\frac{\lambda R(\beta_B + 0.5\theta_y)}{2k_{\text{сф}} v_o^2 t_H k_{\text{тр}}}; \\ K_{x4} &= \frac{\partial(\Delta x)}{\partial t_H} = -\frac{\lambda R(\beta_B + 0.5\theta_y)}{2k_{\text{сф}} v_o t_H^2 k_{\text{тр}}}. \end{aligned} \quad (6)$$

11. Используя (6), получим формулы для вычисления суммарной погрешности разрешающей способности в азимутальном направлении [5]:

– для режима детальной и маршрутной съемки:

$$\xi[\Delta x] = \left[K_{x1}^2 \xi^2(\lambda) + K_{x2}^2 \xi^2(R) + K_{x3}^2 \xi^2(v_o) + K_{x4}^2 \xi^2(t_H) \right]^{0.5};$$

– для режима обзорной съемки и режима наблюдения морских объектов:

$$\xi[\Delta x] = K_R \left[K_{x1}^2 \xi^2(\lambda) + K_{x2}^2 \xi^2(R) + K_{x3}^2 \xi^2(v_o) + K_{x4}^2 \xi^2(t_H) \right]^{0.5}$$

Апробирование представленной методики произведено при репрезентативном наборе физически реализуемых данных с верификацией результатов по соответствующим показателям существующих систем. Далее приведен пример расчетов (априорной) оценки разрешающих способностей по дальности и в азимутальном направлении по предлагаемой методике.

Исходные данные для расчета [12–15]:

- тип зондирующего сигнала – ЛЧМ;
- длина волны РСА $\lambda = 0.03$ м;
- девиация частоты – $\Delta f = 398, 298, 239$ МГц;
- угол визирования $\beta_B = 25 \dots 45^\circ$;
- ширина ДНА в угломестной плоскости $\theta_y = 1.05^\circ$;
- высота орбиты $H = 600$ км;
- орбитальная скорость КА – носителя ВРЛК $v_o = 1649$ м/с;
- дальность до цели $R = 660 \dots 870$ км;
- время синтезирования $t_H = 8.05 \dots 8.71$ с;

– коэффициент ухудшения разрешающей способности $k_{вес} = 1.47$;

– температура $t = 10$ °С;

– атмосферное давление $p_{атм} = 1010$ мбар;

– давление водяных паров $e = 1.23$ мбар;

– СКО девиации частоты $\xi[\Delta f] = 1$ МГц;

– СКО определения угла визирования $\xi[\beta_B] = 0.01^\circ$;

– СКО определения ширины ДНА в угломестной плоскости $\xi[\theta_y] = 0.01^\circ$;

– СКО определения длины волны $\xi[\lambda] = 0.0001$ м;

– СКО определения коэффициента расширения импульса $\xi[k_{вес}] = 0.001$;

– СКО определения наклонной дальности $\xi[R] = 100$ м;

– СКО определения орбитальной скорости КА $\xi[v_o] = 10$ м/с;

– СКО определения времени синтезирования $\xi[t_H] = 0.0001$ с.

Результаты расчетов для различных углов визирования и значений девиации частоты представлены в табл. 2 и 3.

Табл. 2. Разрешающая способность РСА по дальности в режиме детальной съемки

Table 2. Range resolution of the SAR in the detailed shooting mode

β_B, \dots°	$L, \text{ км}$	Разрешающая способность по дальности, м			Погрешность расчета, мм		
		$\Delta f, \text{ МГц}$			$\Delta f, \text{ МГц}$		
		398	298	239	398	298	239
25.0	283	1.18	1.57	1.96	27.5	36.7	45.7
26.0	296	1.14	1.52	1.89	25.3	33.8	42.1
27.0	310	1.10	1.47	1.83	23.4	31.2	38.9
28.0	324	1.06	1.42	1.77	21.6	28.9	36.0
29.0	338	1.03	1.38	1.71	20.1	26.8	33.4
30.0	352	1.00	1.33	1.66	18.7	24.9	31.1
31.0	367	0.97	1.30	1.62	17.4	23.3	29.0
32.0	382	0.94	1.26	1.57	16.3	21.7	27.1
33.0	398	0.92	1.23	1.53	15.2	20.3	25.4
34.0	414	0.90	1.20	1.49	14.3	19.1	23.8
35.0	431	0.87	1.17	1.45	13.4	17.9	22.3
36.0	448	0.85	1.14	1.42	12.6	16.8	21.0
37.0	465	0.83	1.11	1.39	11.9	15.9	19.8
38.0	484	0.81	1.09	1.36	11.2	15.0	18.7
39.0	502	0.80	1.06	1.33	10.6	14.1	17.6
40.0	522	0.78	1.04	1.30	10.0	13.4	16.7
41.0	542	0.77	1.02	1.27	9.5	12.6	15.8
42.0	563	0.75	1.00	1.25	9.0	12.0	14.9
43.0	585	0.74	0.98	1.23	8.5	11.4	14.2
44.0	608	0.72	0.97	1.20	8.1	10.8	13.4
45.0	632	0.71	0.95	1.18	7.7	10.2	12.8

Табл. 3. Разрешающая способность РСА в азимутальном направлении в режиме детальной съемки
 Table 3. Resolution of the SAR in azimuth direction in the detailed shooting mode

β_B, \dots°	$L, \text{ км}$	$t_H, \text{ с}$	$R, \text{ км}$	Разрешающая способность в азимутальном направлении, м	Погрешность расчета, мм
25.0	283	8.05	666	0.18	0.7
26.0	296	8.07	672	0.18	0.7
27.0	310	8.09	678	0.18	0.7
28.0	324	8.11	685	0.18	0.7
29.0	338	8.13	692	0.18	0.7
30.0	352	8.15	700	0.18	0.8
31.0	367	8.18	708	0.19	0.8
32.0	382	8.2	716	0.19	0.8
33.0	398	8.23	725	0.19	0.8
34.0	414	8.26	735	0.19	0.8
35.0	431	8.29	745	0.20	0.8
36.0	448	8.32	755	0.20	0.8
37.0	465	8.36	766	0.20	0.8
38.0	484	8.39	778	0.21	0.8
39.0	502	8.43	790	0.21	0.9
40.0	522	8.47	804	0.22	0.9
41.0	542	8.51	818	0.22	0.9
42.0	563	8.56	832	0.22	0.9
43.0	585	8.61	848	0.23	0.9
44.0	608	8.66	865	0.24	1.0
45.0	632	8.71	883	0.24	1.0

Выводы. Анализ полученных результатов свидетельствует об адекватности использованного математического аппарата, обеспечившего получение расчетными методами важной технической характеристики космической РСА, в частности оценки пространственного разрешения ее бортовой аппаратуры с учетом влияния разнородных факторов внешней среды.

Разработанные методы позволяют проводить специальные расчеты априорной оценки предельно возможной пространственной разрешающей способности РЛИ для следующих режимов функционирования ВРЛК: детальной, маршрутной и обзорной съемки, наблюдения объектов, находящихся на водной или равнинной поверхности Земли.

Следует также отметить, что предложенные методы получения оценок пространственной разрешающей способности могут обеспечивать эффективное решение задач по проведению сравни-

тельного анализа РСА с альтернативными отечественными или зарубежными аналогами.

Таким образом, разработанная методика расчетной (априорной) оценки разрешающей способности по дальности и в азимутальном направлении с учетом влияния параметров атмосферы позволяет оценить геометрические параметры объектов, которые возможно будет зафиксировать на РЛИ, а также обосновать требования к выбору ВРЛК с заданными тактико-техническими характеристиками.

Практическая значимость предложенной методики заключается в ее применимости как инструментария оптимизации выбора конструктивного построения перспективных ВРЛК на этапе жизненного цикла их проектирования, что существенно сократит временные и финансовые затраты создания сложных систем при обеспечении требуемых характеристик качества их функционирования.

Список литературы

1. Справочник по радиолокации: в 2 кн. Кн. 2 / под ред. М. И. Сколника; пер. с англ. под ред. В. С. Вербы. М.: Техносфера, 2015. 680 с.
2. Свистов В. М. Радиолокационные сигналы и их обработка М.: Сов. радио, 1977. 448 с.
3. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / под ред. В. С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
4. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справочник / Я. Д. Ширман, Ю. И. Лосев, Н. Н. Минервин и др.; под ред. Я. Д. Ширмана; ЗАО "МАКВИС". М., 1998. 828 с.
5. Современная радиолокация / пер. с англ. под ред. Ю. Б. Кобзарева. М.: Сов. радио, 1969. 704 с.
6. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изобра-

жений; под ред. Л. А. Школьного. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2008. 513 с.

7. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли / под ред. Г. С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.

8. Авиационные системы радиовидения / под ред. Г. С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2015. 648 с.

9. Винокуров В. И., Генкин В. А., Калениченко С. П. Морская радиолокация / под ред. В. И. Винокурова. Л.: Судостроение, 1986. 256 с.

10. Paduan J. D., Washburn L. High-Frequency Radar Observations of Ocean Surface Currents // Annual Review of Marine Science. 2012. Vol. 5, iss. 1. P. 115–136. doi: 10.1146/annurev-marine-121211-172315

11. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения,

теоремы, формулы / пер. с англ. под общ. ред. И. Г. Арамановича. М.: Наука, 1974. 831 с.

12. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В. Н. Антипов, В. Е. Горяинов, А. Н. Кулин и др.; под ред. В. Т. Горяинова. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.

13. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Ч. 1. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. 164 с.

14. Куприяшкин И. Ф., Лихачев В. П. Космическая радиолокационная съемка земной поверхности в условиях помех. Воронеж: Науч. кн., 2014. 460 с.

15. Занин К. А. Анализ качества координатной привязки изображений космического радиолокатора с синтезированной апертурой // Вестн. НПО им. С. А. Лавочкина. 2013 № 4. С. 34–39.

Информация об авторах

Гусев Сергей Николаевич – кандидат технических наук (2019), начальник лаборатории военного института (научно-исследовательского) ФГБВОУ "Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского" (ВКА). Автор более 20 научных и учебно-методических публикаций. Сфера научных интересов – радиоэлектронная борьба и радиолокационные системы.

Адрес: Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, ул. Ждановская, д. 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия

E-mail: gusev_sn@mail.ru

Журавлев Сергей Викторович – кандидат технических наук (1993), старший научный сотрудник (2000) ВКА. Автор более 20 научных и учебно-методических публикаций, 14 авторских свидетельств и патентов. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов и навигационные системы.

Адрес: Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, ул. Ждановская, д. 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия

E-mail: sawojar@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8520-9203>

Попов Анатолий Васильевич – кандидат технических наук (1989), старший научный сотрудник (1998) ВКА. Автор более 30 научных и учебно-методических публикаций, 7 авторских свидетельств и патентов. Сфера научных интересов – радиолокация и цифровая обработка сигналов.

Адрес: Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, ул. Ждановская, д. 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия

E-mail: avpop55@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4955-4031>

References

1. Skolnik M. I. Radar Handbook, Third Edition. Ed. 2. tr. from eng. V. S. Verbi. M., *Tehnosfera*, 2015, 680 p. (In Russ.)

2. Svistov V. M. Radar signals and their processing. M., Sov. Radio, 1977, 448 p.

3. Space-based earth survey radar systems. Ed. by V. S. Verba. M., Radio Engineering, 2010, 680 p.

4. Shirman Ya. D., Losev Yu. I., Minervin N. N. et.; ed. by Ya. D. Shirman. Radioelectronic systems: fundamentals of construction and theory: reference. M., ZAO "MAQUIS", 1998, 828 p.

5. Modern radar. Trans. from English. Ed. by Yu. B. Kobzarev. M., *Sov. radio*, 1969, 704 p.

6. The radar system of air reconnaissance, the interpretation of radar images. Ed. by L. A. Shkolny. M., ed. VVIA im. prof. N. E. Zhukovsky, 2008, 513 p.

7. Radio vision. Radar systems for remote sensing of the Earth. Ed. by G. S. Kondratenkov. M., Radio Engineering, 2005, 368 p.

8. Aviation radio vision systems. Ed. by G. S. Kondratenkov. M., Radio Engineering, 2015, 648 p.

9. Vinokurov V. I., Genkin V. A., Kalenichenko S. P. Morskaya radolokatsiya. ed. V. I. Vinokurov. L., *Sudostroenie*, 1986, 256 p.

10. Paduan J. D., Washburn L. High-Frequency Radar Observations of Ocean Surface Currents. Annual Review

of Marine Science. 2012, vol. 5, iss. 1, pp. 115–136. doi: 10.1146/annurev-marine-121211-172315

11. Korn G., Korn T. Handbook of Mathematics for researchers and engineers. Definitions, theorems, formulas. under the general editorship of I. G. Aramanovich. M., *Nauka*, 1974, 831 p. (accessed 22.06.2020)

12. Antipov V. N., Goryainov V. E., Kulin A. N. et al. Radar stations with digital synthesis of the antenna aperture; ed. by V. T. Goryainov M., Radio and Communications, 1988, 304 p.

13. Konovalov A. A. Fundamentals of trajectory processing of radar information. Part 1. St Petersburg, Publishing House of SPbGETU "LETI", 2013. 164 p.

14. Kudryashkin I. F., Likhachev V. P. Space radar imagery of the earth's surface in the presence of noise. Voronezh, *Nauchnaya kniga*, 2014. 460 p.

15. Zanin K. A. Analysis of the quality of the coordinate reference of images of a space radar with a synthesized aperture. Bulletin of the S. A. Lavochkin NGO. 2013, no. 4, pp. 34–39.

Information about the authors

Sergey N. Gusev, Cand. Sci. (Eng.) (2019), Head of the laboratory of the Mozhaisky Military Space Academy (MSA). Author of more than 20 scientific and educational publications. Area of expertise: electronic warfare and radiolocation systems.

Address: A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 13 Zhdanovskaya St., St Petersburg 197198, Russia
E-mail: gusev_sn@mail.ru

Sergey V. Zhuravlev, Cand. Sci. (Eng.) (1993), Senior Researcher (2000) of the MSA. Author of more than 20 scientific and educational publications, 14 author's certificates and patents. Area of expertise: digital signal processing and navigation systems.

Address: A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 13 Zhdanovskaya St., St Petersburg 197198, Russia
E-mail: sawojar@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8520-9203>

Anatolij V. Popov, Cand. Sci. (Eng.) (1989), Senior Researcher (1998) of the MSA. Author of more than 30 scientific and educational publications, 7 author's certificates and patents. Area of expertise: digital signal processing and radiolocation systems.

Address: A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 13 Zhdanovskaya St., St Petersburg 197198, Russia
E-mail: avpop55@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4955-4031>
