

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2022.6.3.002

УДК 621.396.961

## Оценивание статистических радиолокационных характеристик объекта по пространственной диаграмме обратного рассеяния в эквидистантной угловой сетке

В. В. Неёлов, А. А. Самородов ✉

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского,  
Россия, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13

✉ vka@mil.ru

### Аннотация

Представлен методический подход к оцениванию статистических радиолокационных характеристик объекта (среднего и медианного значений, а также среднеквадратического отклонения ЭПР) с использованием пространственной диаграммы обратного рассеяния, сформированной в узлах эквидистантной азимутально-угломестной координатной сетки. Подход основан на предположении равномерного закона распределения ракурсов наблюдения объекта и реализует построение вариационного ряда из отсчетов ЭПР диаграммы, взвешенных с функцией плотности вероятности углов локации. Значения функции определяются отношением площади окружающей узел ячейки координатной сетки к полной площади сектора локации, соответствующего телесному углу  $4\pi$ . Расчет площадей ячеек, имеющих форму сферических многоугольников, реализован с использованием соотношений геометрии пространств постоянной кривизны. Произведена апробация предложенного подхода с использованием модельной пространственной диаграммы обратного рассеяния тестового объекта. Для верификации полученных результатов разработана имитационная модель построения равномерно распределенных точек на поверхности сферической координатной сетки, описывающая наблюдение объекта со случайных равновероятных ракурсов. Сопоставление результатов имитационного моделирования со статистиками ЭПР, определенными с использованием вариационного ряда, свидетельствует о корректности предложенного методического подхода.

### Ключевые слова

эквидистантная угловая сетка, диаграмма обратного рассеяния, вариационный ряд, весовая обработка, статистические характеристики эффективной площади рассеяния.

### Для цитирования

Неёлов В. В., Самородов А. А. Оценивание статистических радиолокационных характеристик объекта по пространственной диаграмме обратного рассеяния в эквидистантной угловой сетке. *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;6(3):259–268. DOI: 10.15826/urej.2022.6.3.002.

© Неёлов В. В., Самородов А. А., 2022

## Estimation of statistical radar characteristics of object by spatial diagram of backscattering in equidistant angular grid

V. V. Neyolov, A. A. Samorodov ✉

Mozhaisky Space Military Academy,  
13, Zhdanovskaya Str., Saint Petersburg, 197198, Russia

✉ vka@mil.ru

### Abstract

The methodological approach to estimation the statistical radar characteristics (mean, median and rms-square deviation values of RCS) of an object using a spatial diagram of backscattering formed in nodes of an equidistant azimuthal-angular coordinate grid is presented. The proposed approach is tried out using the model spatial diagram of backscattering of the tested object. The approach is based on the assumption of the uniform law of distributing he views of an object and implements the formation of a variation series from the samples of the RCS diagram weighted with the probability density function of the location angles. The values of the function are determined by the ratio of the area surrounding the node of the grid cell to the total area of the location sector corresponding to the solid angle  $4\pi$ . The calculation of areas of cells having the shape of spherical polygons is implemented using the relations of geometry of constant curvature regions. The proposed approach is tried out using a model spatial diagram of backscattering of a test object. To verify the obtained results, a simulation model of formation evenly distributed points on the surface of a spherical coordinate grid describing the observation of an object from random equivocal angles has been developed. To verify the obtained results, a simulation model of formation evenly distributed points on the surface of a spherical coordinate grid describing the observation of an object from random equivocal angles has been developed.

### Keywords

equidistant angular grid, backscattering diagram, variation series, weight processing, statistical characteristics of radar cross section

### For citation

Neyolov V. V., Samorodov A. A. Estimation of statistical radar characteristics of object by spatial diagram of backscattering in equidistant angular grid. *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;6(3):259–268. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2022.6.3.002.

### Введение

Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) характеризует отражающие свойства объекта в СВЧ-диапазоне. В силу того, что ЭПР большинства техногенных объектов существенно зависит от ракурса локации, для оценивания дальности радиолокационного наблюдения и соответствующего отношения сигнал/шум ис-

пользуются ее статистики – среднее  $\bar{\sigma}$  и медианное  $\sigma_{50}$  значения, а также ее среднеквадратическое отклонение  $\sigma_v$  [1–3]. Расчет указанных статистик выполняется с использованием вариационного ряда, составленного из значений ЭПР, соответствующих направлениям наблюдения объекта, и являющимся выборкой из его пространственной диаграммы обратного рассеяния (ДОР).

Кроме указанных статистик с использованием вариационного ряда могут быть оценены моментные характеристики ЭПР, используемые в качестве информативных признаков при радиолокационном распознавании объектов [4; 5], плотность распределения, позволяющая оценивать вид закона распределения ЭПР для его последующей параметризации, а также корреляционная функция флуктуаций ЭПР.

### Постановка задачи

При моностатической локации направление наблюдения объекта определяется в связанной с ним сферической системе координат (рис. 1) двумя углами: азимутом  $\varphi$  и углом места  $\theta$ . Пространственная ДОР охватывает угловой сектор  $\varphi = 0^\circ \dots 360^\circ$ ,  $\theta = -90^\circ \dots 90^\circ$  и соответствует телесному углу  $4\pi$  стерадиан. На практике формирование пространственной ДОР осуществляется путем последовательных измерений (расчетов) величины ЭПР объекта в азимутальных плоскостях (сечениях) при различных величинах угла места [6]. Шаг изменения каждого из углов принимается постоянным и выбирается с учетом обеспечения не менее 8...10 отсчетов на лепесток с минимальной шириной, определяемой выражением:

$$\psi_{\min} = \frac{\lambda}{L}, \quad (1)$$

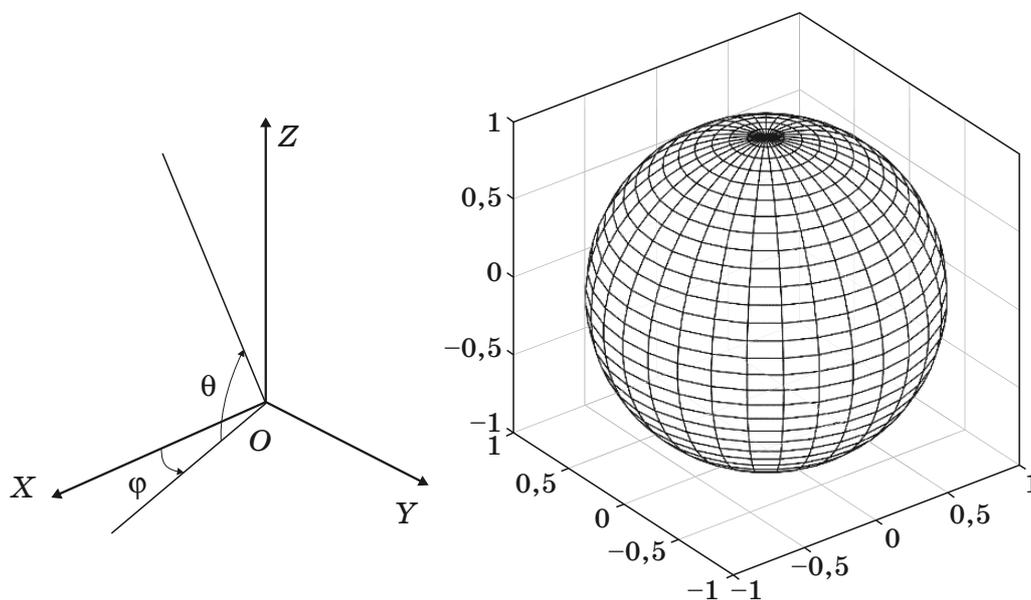
где  $\psi_{\min}$  – минимальная ширина лепестка ДОР объекта, выраженная в радианах,  $\lambda$  – длина волны зондирующего сигнала,  $L$  – максимальный размер объекта, определяемый в плоскости отсчета соответствующего угла.

Когда шаги изменения азимута и угла места равны и постоянны, формируется эквидистантная (в угловой мере) координатная сетка, покрывающая всевозможные направления локации объекта. Узлы сетки совпадают с точками пересечения ее параллелей и меридианов (рис. 1) и соответствуют отсчетам ЭПР пространственной ДОР объекта.

Если объект не стабилизирован в пространстве и в процессе локации может совершать вращательное движение вокруг собственного центра масс, ракурс его наблюдения является случайным. Рассмотрим ситуацию, когда распределения углов  $\varphi$  и  $\theta$

подчиняются равномерному закону. В этом случае статистические оценки ЭПР, полученные в ходе наблюдения объекта, будут отличаться от рассчитанных при непосредственном использовании выборки, составленной из отсчетов значений ДОР в равноотстоящих (в угловой мере) узлах координатной сетки. Это обусловлено неравномерным характером пространственного распределения узлов координатной сетки. Из рисунка видно, что плотность расположения точек расчета (измерения) ЭПР объекта возрастает по мере приближения к полюсам эквидистантной азимутально-угломестной (сферической) сетки, в результате чего при определении статистических характеристик ЭПР объекта вклады с соответствующих направлений будут суммироваться чаще, приводя к получению смещенных оценок.

Для устранения указанного смещения необходимо изменить подход к построению вариационного ряда, введя весовые коэффициенты для значений ЭПР каждого из узлов координатной сетки, описывающие вероятность локации объекта с соответствующего направления. В анализируемой ситуации величины указанных коэффициентов зависят только от положения узлов в сферической системе координат и соответствуют отношению площади окружающей узел ячейки координатной сетки к полной площади сферы (рис. 2).



**Рис. 1.** Сферическая система координат (слева) и эквидистантная координатная сетка формирования пространственной ДОР в телесном угле  $4\pi$  страд. (справа)

**Fig. 1.** Spherical coordinate system (left) and equidistant coordinate grid of spatial diagram backscattering formation in solid angle  $4\pi$  (right)

## Расчет весовых коэффициентов для формирования вариационного ряда значений ЭПР

Каждый из узлов эквидистантной координатной сетки, в которой сформирована пространственная ДОР, в общем случае может рассматриваться как центр выпуклого сферического многоугольника: для узлов  $E_i$ , расположенных на экваторе координатной сферы – сферического прямоугольника, для узлов  $N_i$ , находящихся между полюсом и экватором – сферической трапеции. Для узлов координатной сетки, совпадающих с полюсами  $P_1, P_2$ , узел является вершиной сферического треугольника.

Вершинами сферических многоугольников являются точки пересечения лучей, выходящих из начала координат со сферической поверхностью, а сторонами – углы между лучами, не превышающие  $2\pi$  [7]. Каждой стороне многоугольника соответствует дуга на поверхности сферы с координатной сеткой (рис. 2).

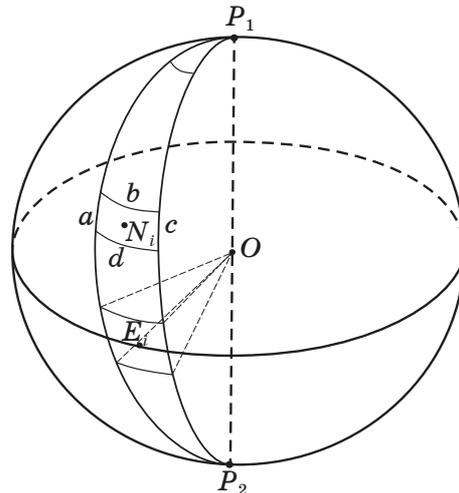


Рис. 2. Сферические многоугольники, связанные с узлами  $E_i, N_i, P_1$  и  $P_2$  эквидистантной координатной сетки

Fig. 2. Spherical polygons associated with nodes  $E_i, N_i, P_1$  and  $P_2$  of equidistant coordinate grid

Площадь  $S_N$  сферической трапеции находится из соотношения [8]:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}^2 \frac{S_N}{4} = & \frac{\sin^2 \frac{b+d}{2} \sin \frac{a+b-c-d}{4} \sin \frac{a+b+c-d}{4}}{\sin^2 \frac{b-d}{2} \cos \frac{a-b-c-d}{4} \cos \frac{a-b+c-d}{4}} \times \\ & \times \frac{\sin \frac{-a+b+c-d}{4} \sin \frac{a-b+c+d}{4}}{\cos \frac{a+b-c+d}{4} \cos \frac{a+b+c+d}{4}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $a, b, c, d$  – стороны сферического многоугольника.

Учитывая, что  $a = c$ , соотношение (2) преобразуется к виду:

$$tg^2 \frac{S_N}{4} = \frac{\sin^2 \frac{b+d}{2} \sin^2 \frac{b-d}{4}}{\sin^2 \frac{b-d}{2} \cos^2 \frac{b+d}{4}} tg \frac{2a+b-d}{4} tg \frac{2a-(b-d)}{4}. \quad (3)$$

Выражение (3) к расчету площади сферических прямоугольников  $S_E$  неприменимо. В этом случае используется соотношение [8]:

$$tg^2 \frac{S_E}{4} = \frac{\sin \frac{p-a}{2} \sin \frac{p-b}{2} \sin \frac{p-c}{2} \sin \frac{p-d}{2}}{\cos \frac{a}{2} \cos \frac{b}{2} \cos \frac{c}{2} \cos \frac{d}{2}}, \quad (4)$$

где  $p$  – полупериметр прямоугольника,

$$p = \frac{a+b+c+d}{2}.$$

Учитывая, что  $a = c$ ,  $b = d$ , получим:

$$tg^2 \frac{S_E}{4} = tg^2 \frac{a}{2} tg^2 \frac{b}{2}. \quad (5)$$

Площадь сферических треугольников  $S_P$  определяется при помощи выражения [9]:

$$tg^2 \frac{S_P}{4} = tg \frac{p}{2} tg \frac{p-a}{2} tg \frac{p-b}{2} tg \frac{p-c}{2}, \quad (6)$$

где  $p$  – полупериметр треугольника,

$$p = \frac{a+b+c}{2}.$$

Величина весового коэффициента  $k_{ij}$  для значения ЭПР в узле координатной сетки, определяемом углами  $\varphi_i$  и  $\theta_j$ , вычисляется как:

$$k_{ij} = k(\varphi_i, \theta_j) = \frac{S_{ij}}{4\pi}, \quad (7)$$

где  $S_{ij}$  – площадь сферического многоугольника.

### Апробация методического подхода

Для апробации предложенного методического подхода была рассчитана пространственная ДОР тестового отражателя канонической формы – прямого кругового цилиндра, сечение которой в азимутальной плоскости представлено на рис. 3 ( $L$  – длина образующей,  $r$  – радиус). Частота зондирующего сигнала – 3 ГГц, шаг дискретизации диаграммы –  $0,25^\circ$ .

На диаграмме идентифицируются пики, соответствующие рассеянию волн торцевыми гранями цилиндра ( $\varphi = 0^\circ$  и  $180^\circ$ ),

а также его образующей ( $\varphi = 90^\circ$ ). Минимальная ширина лепестка диаграммы составляет  $\psi_{\min} = 0,25\lambda/r = 0,05$  рад. = 2,86 град.

В табл. 1 приведены оценки статистических характеристик ЭПР тестового отражателя (среднего и медианного значений, среднеквадратического отклонения), определенные по исходной и взвешенной пространственным ДОР.

Анализ данных таблицы показывает, что средние значения ЭПР, как и величины среднеквадратических отклонений, различаются более, чем на 10 дБ, в тоже время медианные значения практически совпадают. Это обусловлено особенностью анализируемой ДОР, заключающейся в наличии всего трех выраженных пиков при значительном количестве боковых лепестков с уровнями ЭПР порядка  $-15...-11$  дБ.

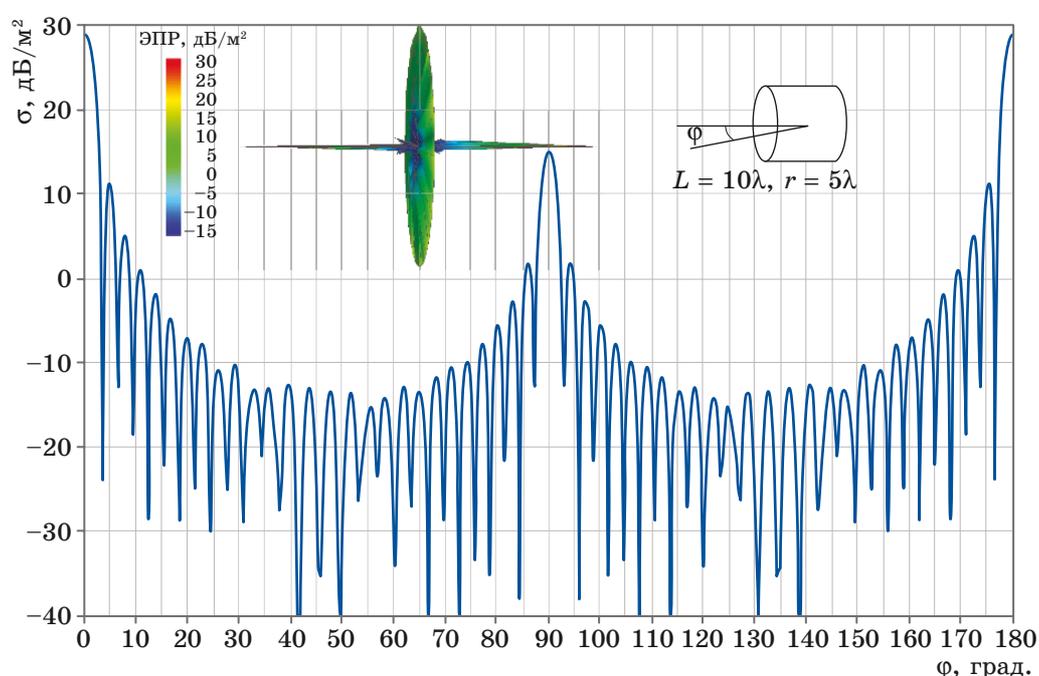


Рис. 3. Сечение пространственной диаграммы обратного рассеяния тестового отражателя в плоскости угла  $\varphi$

Fig. 3. Section of the backscatter spatial diagram of the test reflector in the angle plane  $\varphi$

Таблица 1. Оценки статистических характеристик ЭПР тестового отражателя

Table 1. RCS estimates statistical characteristics of the tested reflector

Вид обработки	$\bar{\sigma}$	$\sigma_{50}$	$\sigma_v$
Непосредственная	14,85 м <sup>2</sup> (11,7 дБ)	0,043 м <sup>2</sup> (-13,6 дБ)	89,26 м <sup>2</sup> (19,5 дБ)
Весовая	1,17 м <sup>2</sup> (0,7 дБ)	0,042 м <sup>2</sup> (-13,7 дБ)	11,73 м <sup>2</sup> (10,69 дБ)

## Верификация результатов оценивания с использованием имитационной модели

Для контроля корректности предложенного методического подхода имитировалось наблюдение тестового отражателя с различных равновероятных направлений локации, описываемых равномерно распределенными точками по всей поверхности координатной сферы. Положение каждой из указанных точек задавалось двумя углам  $\varphi$  и  $\theta$ , определяемыми соотношениями:

$$\begin{aligned}\theta &= \arccos(2\mathcal{R}\{-1\} - 1) - 90^\circ, \\ \varphi &= 360^\circ \mathcal{R}\{0, 1\},\end{aligned}\quad (8)$$

где оператор  $\mathcal{R}\{0, 1\}$  формирует случайное число с равномерным законом распределения на интервале  $[0, 1]$ .

Количество генерируемых точек варьировалось и составляло от 100 до 1000% от общего числа узлов координатной сетки пространственной ДОР (рис. 4).

Для каждого из ракурсов локации определялся ближайший узел пространственной ДОР, соответствующее значение ЭПР которого выбиралось для построения вариационного ряда. В результате имитационного моделирования установлено, что при количестве точек, шестикратно превышающем объем выборки ДОР, достигалась сходимость оцениваемых статистик. При этом расхождения со значениями, полученными в ходе весовой обработки, не превышали 8...12%, что свидетельствует об эффективности реализованного подхода.

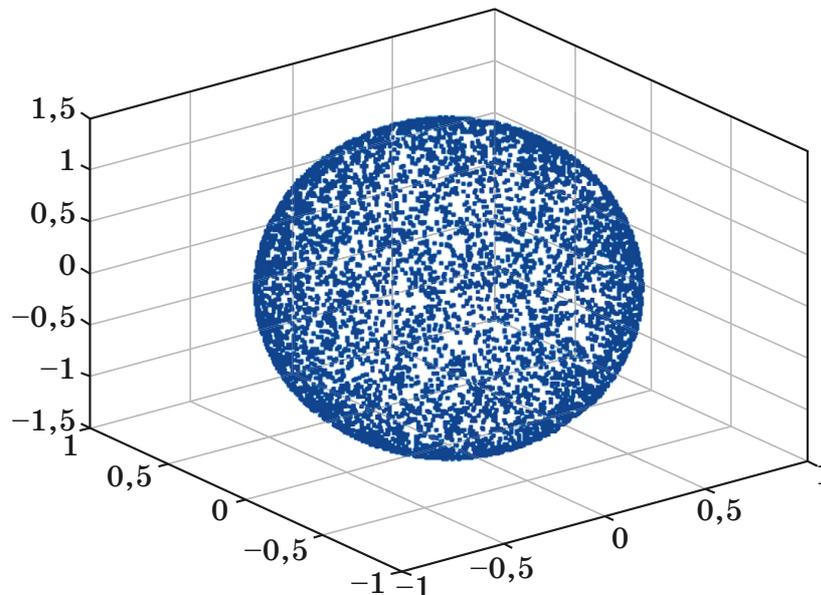


Рис. 4. Равномерное распределение точек на поверхности координатной сферы

Fig. 4. Uniform distribution of points on the surface of the coordinate sphere

## Заключение

Предложенный методический подход позволяет осуществлять весовую обработку пространственных диаграмм обратного рассеяния, сформированных в эквидистантной угловой сетке и полученных в ходе натуральных измерений или рассчитанных с помощью методов математического моделирования. Подход обеспечивает возможность оценивания статистических характеристик ЭПР, необходимых для решения задач, связанных с анализом радиолокационной наблюдаемости объектов. Проведенные в процессе исследования апробация подхода с использованием пространственной ДОР тестового отражателя, а также верификация при помощи имитационной модели подтвердили его реализуемость и корректность.

Подход имеет универсальный характер и может быть применен для анализа пространственных сигнатур, сформированных в различных диапазонах длин волн электромагнитного спектра. В дальнейшем рационально выполнить доработку подхода в направлениях расчета весовых коэффициентов, соответствующих наблюдению стабилизированного по трем осям объекта локации в ограниченном секторе ракурсов. В этом случае значения весовой функции могут быть получены посредством имитационного моделирования наблюдения объекта при использовании исходных данных, определяющих гистограмму распределения сферических углов наблюдения объекта.

## Список литературы

1. Barton D. K. *Radar Equations for Modern Radar*. London: Artech house; 2013. 448 p.
2. Skolnik M. I. *Radar Handbook*. 3<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill Co.; 2008. 1352 p.
3. Blake L. V. *Radar Range-Performance Analysis*. Lexington, MA: D. C. Heath; 1980; Dedham, MA: Artech House; 1986.
4. Штагер Е. А., Чаевский Е. В. *Рассеяние волн на телах сложной формы*. М.: Советское радио; 1974. 240 с.
5. Штагер Е. А. *Рассеяние радиоволн на телах сложной формы*. М.: Радио и связь; 1986. 184 с.
6. Майзельс Е. Н., Торгованов В. А. *Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей*. М.: Советское радио; 1972. 232 с.
7. Алексеевский Д. В., Винберг Э. Б., Солодовников А. С. *Геометрия пространств постоянной кривизны*. М.: ВИНТИ; 1988. 144 с.
8. Байгонакова Г. А., Соколова Д. Ю. О площади трапеции в сферической геометрии. *Вестник Кемеровского государственного университета*. 2012;(4-2);6–10. Режим доступа: <https://vestnik.kemsu.ru/jour/article/view/3571>
9. Bilinski S. Zur Begründung der elementaren Inhaltslehre in der hyperbolischen Ebene. *Mathematische Annalen*. 1969;180(3):256–268. <https://doi.org/10.1007/BF01350742>

## References

1. Barton D.K. *Radar Equations for Modern Radar*. London: Artech house; 2013. 448 p.
2. Skolnik M.I. *Radar Handbook*. 3<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill Co.; 2008. 1352 p.
3. Blake L.V. *Radar Range-Performance Analysis*. Lexington, MA: D.C. Heath; 1980; Dedham, MA: Artech House; 1986.
4. Shtager E.A., Chaevsky E.V. *Scattering of waves on bodies of complex shape*. Moscow: Sovetskoe radio; 1974. 240 p. (In Russ.)
5. Shtager E.A. *Scattering of radio waves on bodies of complex shape*. Moscow: Radio i svyaz; 1986. 184 p. (In Russ.)
6. Meisels E.N., Torgovanov V.A. *Measurement of scattering characteristics of radar targets*. Moscow: Sovetskoe radio; 1972. 232 p. (In Russ.)
7. Alekseevsky D.V., Vinberg E.B., Solodovnikov A.S. *Geometry of constant curvature spaces*. Moscow: VINITI; 1988. 144 p. (In Russ.)
8. Bajgonakova G.A., Sokolova D.Yu. On the area of a trapezoid in spherical geometry. *Bulletin of Kemerovo State University*. 2012;(4-2);6–10. (In Russ.) Available at: <https://vestnik.kemsu.ru/jour/article/view/3571>
9. Bilinski S. Zur Begründung der elementaren Inhaltslehre in der hyperbolischen Ebene. *Mathematische Annalen*. 1969;180(3):256–268. <https://doi.org/10.1007/BF01350742>

## Информация об авторах

**Неёлов Владимир Викторович**, кандидат технических наук, начальник лаборатории Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

**Самородов Алексей Аркадьевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

## Information about the authors

**Vladimir V. Neyolov**, Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory, Mozhaysky Space-Military Academy, Saint Petersburg.

**Alexey A. Samorodov**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Mozhaysky Space-Military Academy, Saint Petersburg.

Поступила / Received: 29.08.2022

Принята в печать / Accepted: 06.09.2022