

**В. В. Артюшенко<sup>1</sup>, А. В. Никулин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет

# СВЯЗЬ УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ ИМИТИРУЕМЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ПАРАМЕТРАМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ УГЛОВЫХ ШУМОВ\*

*Флуктуации кажущегося центра излучения распределенного объекта возле своего математического ожидания при облучении распределенных объектов зондирующими сигналами радиолокационных станций ученые наблюдают уже многие десятилетия. Известен математический аппарат для описания статистического характера подобных флуктуаций. Эти флуктуации получили название – угловой шум. Однако до сих пор отсутствует аналитическое выражение, связывающее между собой угловые размеры объекта и параметры распределения его угловых шумов. Это выражение необходимо для определения угловых размеров распределенных объектов в задачах имитации отражений от них. В статье обозначенная выше проблема решена двумя способами. При использовании первого способа удастся получить однозначную связь между угловыми размерами объекта и параметрами распределения его угловых шумов, но для каждого нового объекта необходимо заново осуществлять вывод этого соотношения, что не всегда возможно. При использовании второго способа применяется вероятность, с которой флуктуирующий кажущийся центр излучения распределенного объекта попадает в границы этого объекта. Это способ лишен указанного недостатка. Представленные результаты подтверждены средствами цифрового моделирования.*

**Ключевые слова:** полунатурное моделирование, отражения от распределенных объектов, радиолокационные системы, угловой шум, кажущийся центр излучения

## Введение

Очевидным способом испытаний радиолокационных станций (РЛС) является имитация радиолокационной обстановки в лабораторных условиях, так называемое полунатурное моделирование. При проведении полунатурного моделирования часто возникает необходимость проверки всех узлов РЛС, начиная от ее антенной системы и заканчивая алгоритмами обработки сигналов в вычислительной части. Совокупность излучателей, расположенных напротив антенны РЛС, позволяет имитировать отражения непосредственно на апертуре антенны.

Идея замещения отражения от распределенных объектов электромагнитным полем от совокупности излучателей или геометрическими моделями получила широкое распространение [1–3]. Подобные модели позволяют, изменяя положение излучателей в пространстве и/или соотношения мощностей поступающих на них сигналов, управлять положением в пространстве некоторой точки, из которой как бы излучается сигнал. В литературе эта точка

получила название кажущегося центра излучения (КЦИ). Отклонения КЦИ от его математического ожидания носят случайный характер и называются угловыми шумами. Они подчиняются следующему закону распределения [1, 3]:

$$W(\gamma) = \frac{\mu}{2(1 + \mu^2(\gamma - m_\gamma)^2)^{3/2}}, \quad (1)$$

где  $m_\gamma$  – математическое ожидание положения КЦИ,  $\mu$  – параметр, от которого зависит эффективная «ширина» распределения,  $\gamma$  – обобщенная координата [1]. График распределения (1) показан на рис. 1.

Большое число научных работ посвящено выбору расположения точек геометрической модели и законам управления мощностями сигналов, подаваемых на излучатели, для получения требуемых параметров распределения угловых шумов (1) [4–7]. Однако не выведено аналитическое выражение, связывающее параметры распределения (1) с угловыми размерами имитируемых объектов. В этой

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00073.

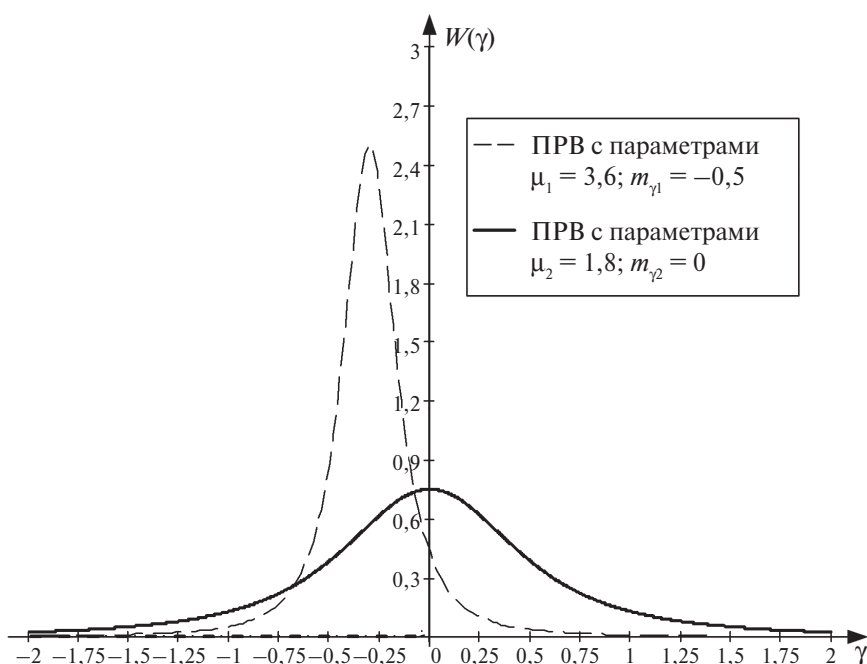


Рисунок 1. Плотности распределения вероятностей углового шума

ситуации неясно, как добиться требуемых угловых размеров имитируемого объекта. Устранению указанного пробела посвящена настоящая статья.

#### Параметры плотности распределения вероятностей угловых шумов распределенного объекта с заданными угловыми размерами

Синтезируем два распределенных объекта, свойства которых несложно проанализировать, и оценим, как меняются характеристики углового шума при изменении угловых размеров этих объектов. Все прочие параметры объектов будем считать идентичными друг другу.

Пусть угловые размеры первого и второго объекта находятся в следующих диапазонах:  $-1^\circ \leq \gamma_1 \leq 1^\circ$  и  $-1^\circ \leq \gamma_2 \leq 0^\circ$ . Распределим в этом диапазоне сто излучающих точек. Сигналы от распределенных объектов будут представлять собой суперпозицию сигналов от каждой точки объекта, при этом каждый сигнал взвешивается диаграммой направленности приемной антенны радиолокатора. Как известно из литературы [1, 3, 4, 8], эти сигналы случайны и статистически независимы. Сигнал, отраженный от одной точки распределенного объекта, при моделировании традиционно [1–3] представляют нормальным случайным процессом с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

Чтобы определить соответствующие объектам параметры распределения (1), воспользуемся распространенным в радиолокации методом амплитудной моноимпульсной пеленгации в вертикальной плоскости [9, 10]. Он основан на сравнении сигналов двух приемных каналов, антенны которых

имеют суммарную ( $\Sigma$ ) и разностную ( $\Delta$ ) диаграммы направленности. По сигналам суммарного и разностного каналов при помощи пеленгационного соотношения выделяется информация об угловом положении цели:

$$f_i(\gamma) = \operatorname{Re} \left( \frac{\dot{U}_{\Delta i}}{\dot{U}_{\Sigma i}} \right), \quad (2)$$

где  $\gamma$  – ошибка пеленгации,  $\dot{U}_{\Sigma i}$  и  $\dot{U}_{\Delta i}$  –  $i$ -е отсчеты сигналов соответственно суммарного и разностного каналов,  $\operatorname{Re}(\dots)$  – операция выделения реальной составляющей.

Чтобы оценить параметры полученного распределения угловых шумов, воспользуемся методом гистограмм [11–13]. На рис. 2 показана оценка плотности распределения вероятностей (ПРВ) углового шума для двух распределенных объектов.

По гистограммам, изображенным на рис. 2, оценим параметры распределения (1):

$$\begin{aligned} m_{\gamma_1} &\approx 0; \\ m_{\gamma_2} &\approx -0,5. \end{aligned}$$

Чтобы получить значение параметра  $\mu$ , достаточно в выражении (1) принять  $\gamma = m_\gamma$ , тогда  $W(m_\gamma) = \frac{\mu}{2}$  – значение ПРВ или гистограммы в точке, совпадающей с математическим ожиданием.

Оценим по гистограммам на рис. 2 значения параметра  $\mu$ :

$$\mu_1 \approx 0,9 \cdot 2 = 1,8, \quad (3)$$

$$\mu_2 \approx 1,8 \cdot 2 = 3,6. \quad (4)$$

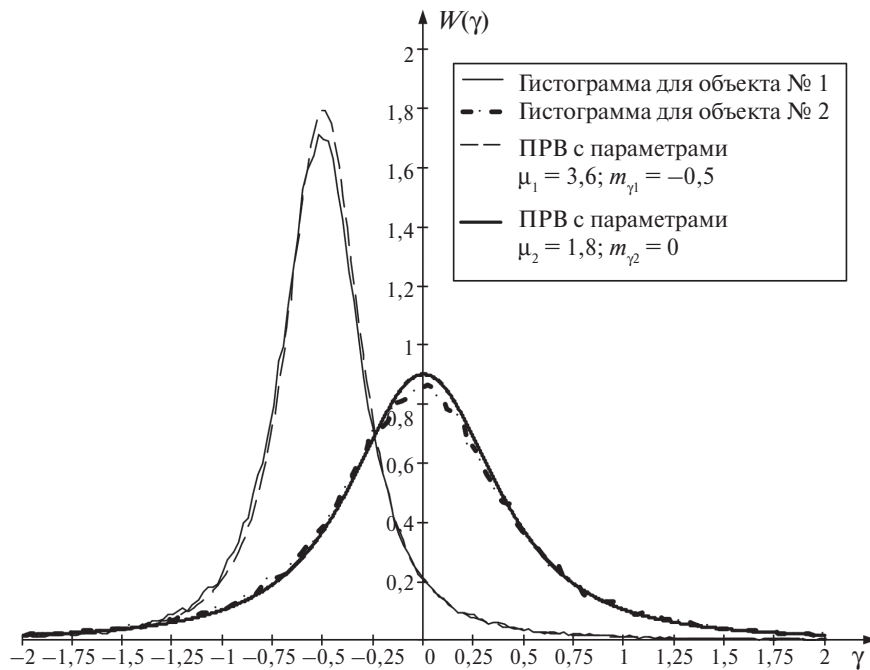


Рисунок 2. Гистограммы распределения углового шума двух объектов с заданными угловыми размерами и плотности распределения вероятностей с заданными параметрами

На рис. 2. показаны ПРВ угловых шумов (1) с найденными параметрами.

Сравнив выражения (3) и (4) с параметрами эксперимента, можно сказать, что между параметром распределения  $\mu$  и угловыми размерами объекта существует связь: чем больше последние, тем меньше значение  $\mu$ . Это соответствует выводам, сделанным в [1], и дает надежду на получение аналитических выражений, связывающих угловые размеры объекта и параметры распределения (1).

**Параметры ПРВ угловых шумов распределенного объекта, заданного своей функцией распределения интенсивности сигналов отражающих точек**

Рассмотрим радиолокационный объект с равномерным распределением интенсивности сигналов отражающих точек  $F_r(\gamma)$  и нормированными размерами  $2a$ :

$$F_r(\gamma) = \sigma^2, -a \leq \gamma \leq a,$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение случайного сигнала от одной отражающей точки распределенного объекта.

Используя известные из [1] выражения, определим параметры распределения (1) – математическое ожидание и  $\mu$ :

$$m_\gamma = \frac{\int_{\gamma} \gamma F_r(\gamma) d\gamma}{\int_{\gamma} F_r(\gamma) d\gamma} = \frac{\int_{-a}^a \gamma \sigma^2 d\gamma}{\int_{-a}^a \sigma^2 d\gamma} = 0,$$

$$\begin{aligned} \mu^2 &= \frac{\int_{\gamma} F_r(\gamma) d\gamma}{\int_{\gamma} (\gamma - m_\gamma)^2 F_r(\gamma) d\gamma} = \frac{\int_{-a}^a \sigma^2 d\gamma}{\int_{-a}^a (\gamma - m_\gamma)^2 \sigma^2 d\gamma} = \\ &= \frac{\int_{-a}^a \sigma^2 d\gamma}{\int_{-a}^a (\gamma - m_\gamma)^2 \sigma^2 d\gamma} = \frac{2\sigma^2 a}{\frac{2}{3} a^3 \sigma^2} = \frac{3}{a^2} \end{aligned} \tag{5}$$

или  $\mu = \frac{\sqrt{3}}{a}$ .

Выражение (5) позволяет однозначно связать параметры распределения (1) и угловые размеры объекта. Однако у него есть существенный недостаток – оно не актуально для других типов радиолокационных объектов, то есть, если изменится распределение интенсивности сигналов, нужно будет повторно определять функцию  $F_r(\gamma)$  и повторять вывод выражения (5).

Знание ПРВ угловых шумов также дает возможность установить связь параметров распределения угловых шумов с угловыми размерами имитируемых распределенных объектов.

**Параметры ПРВ угловых шумов распределенного объекта, КЦИ которого находится в пределах заданного углового размера с определенной вероятностью**

Флуктуации КЦИ возле своего математического ожидания приводят к тому, что его положение может выйти за реальные размеры объекта [1].

По ПРВ (1) можно определить вероятность, с которой КЦИ попадает во фрагмент объекта с угловыми размерами  $2a$  [1]:

$$P(-a \leq \Delta\gamma \leq a) = \int_{-a}^a W(\Delta\gamma) d\gamma, \quad (6)$$

где  $\Delta\gamma = \gamma - m_\gamma$  – отклонение КЦИ от математического ожидания вдоль обобщенной координаты  $\gamma$ .

Подставив в выражение (6) значение выражения (1), получим:

$$\begin{aligned} P(-a \leq \Delta\gamma \leq a) &= \int_{-a}^a \frac{\mu}{2(1+\mu^2\Delta\gamma^2)^{\frac{3}{2}}} d\Delta\gamma = \\ &= \frac{\mu\Delta\gamma}{2\sqrt{\mu^2\Delta\gamma^2+1}} \Big|_{-a}^a = \frac{\mu a}{\sqrt{\mu^2 a^2+1}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Выражение (7) связывает параметр распределения  $\mu$  с нормированными размерами фрагмента распределенного объекта. Преобразовав его, можно найти размеры этой площадки:

$$a = \sqrt{\frac{P^2}{(\mu^2 - P^2\mu^2)}} = \frac{1}{\mu} \frac{P}{\sqrt{1-P^2}}. \quad (8)$$

Сравнив выражения (3) и (8), можно найти вероятность, с которой КЦИ попадает в границы объекта с равномерным распределением интенсивности сигналов отражающих точек. Для рассматриваемого случая эта вероятность равна  $P = 0,866$ , что совпадает с данными в литературе [1].

В качестве проверки рассчитаем по выражениям (8) и (5) значения параметров угловых шумов для распределенных объектов из представленной выше задачи математического моделирования и сравним полученные результаты.

Из графиков на рис. 3 видно, что ПРВ угловых шумов, рассчитанные по выражениям (8) и (5), повторяют форму экспериментально полученных гистограмм, что говорит о правильном подходе к выводу этих выражений.

### Выводы

В работе двумя способами установлена связь параметров ПРВ угловых шумов распределенного объекта с угловыми размерами этого объекта. При использовании первого способа удается получить однозначную связь в виде соотношения (5) между угловыми размерами объекта и параметрами ПРВ его угловых шумов, но для каждого нового объекта необходимо заново осуществлять вывод этого соотношения, что не всегда возможно. При использовании второго способа в качестве исходного параметра берется вероятность, с которой флуктуирующий кажущийся центр излучения распределенного объекта попадает в его границы. Этот способ лишен недостатка первого.

Результаты, представленные в настоящей статье, подтверждены средствами цифрового моделирования. Найденные в работе аналитические выражения позволят сопоставить угловые размеры объекта с параметрами распределения его угловых шумов.

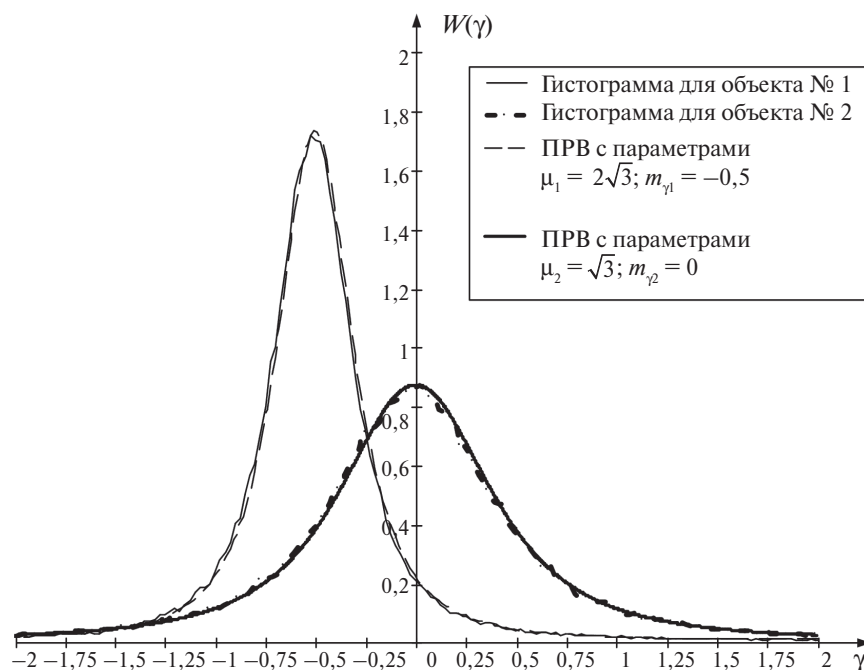


Рисунок 3. Гистограммы распределения углового шума для рассматриваемых объектов и плотность распределения вероятностей углового шума с параметрами, определенными по выведенным выражениям

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Островитянов Р.В., Басалов Ф.А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. М.: Радио и связь, 1982. 232 с.
2. Тверской Г.Н., Терентьев И.П., Харченко Г.К. Имитаторы эхосигналов судовых радиолокационных станций. Л.: Судостроение, 1973. 224 с.
3. Skolnik M.I. Radar Handbook. 3<sup>rd</sup> ed. NY: McGraw Hill, 2008. 1352 p.
4. Зубкович С.Г. Статистические характеристики сигналов, отраженных от земной поверхности. М.: Сов. радио, 1968. 224 с.
5. Kiselev A.V., Nikulin A.V. Algorithm of two-point distributed object model synthesis. Proceedings of the 16<sup>th</sup> International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2015. IEEE. P. 158–161.
6. Киселев А.В., Подкопаев А.О., Степанов М.А. Об эквивалентности двухточечной частично когерентной модели и трехточечной некогерентной // Радиопромышленность. 2018. № 1. С. 62–67.
7. Spectral method of synthesis of geometric models of surface-distributed objects / V. V. Artyushenko, A. V. Kiselev, A. V. Nikulin, M. A. Stepanov. Proceedings of 19<sup>th</sup> international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2018. Erlagol, Altai, 29 June – 3 July 2018. IEEE Computer Society. P. 98–103.
8. Урсатьев А.А., Погребная Н.П. Полунатурная модель сигнально-помеховой радиолокационной обстановки // Управляемые системы и машины. 1991. № 4. С. 102–111.
9. Алиев А., Мищенко О. Математическое моделирование в технике. М.: Институт компьютерных исследований, 2012. 476 с.
10. Канащенков А.И., Меркулов В.И. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т. 1. РЛС – информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов. М.: Радиотехника, 2006. 656 с.
11. Шепель В.Н. Алгоритм определения эмпирической функции плотности по выборке из генеральной совокупности. Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции «Современные информационные технологии в науке и практике». Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. С. 224–226.
12. Шепель В.Н., Акимов С.С. Модернизация метода гистограмм для выявления принадлежности неизвестного массива данных определенному закону распределения вероятностей // Вестник Оренбургского государственного университета. 2014. № 9. С. 179–181.
13. Шепель В.Н. Процедура построения выборочного аналога функции плотности // Вестник Оренбургского государственного университета. 2012. № 2. С. 320–322.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Артюшенко Вадим Валерьевич**, к.т.н., старший преподаватель, кафедра радиоприемных и радиопередающих устройств, Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, Новосибирск, просп. Карла Маркса, д.20, тел.: 8 (383) 346-15-46, e-mail: artushenkomail@mail.ru.

**Никулин Андрей Викторович**, к.т.н., доцент, кафедра радиоприемных и радиопередающих устройств, Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, Новосибирск, просп. Карла Маркса, д.20, тел.: 8 (383) 346-15-46, e-mail: nil\_rtu@ngs.ru.

*For citation: Artyushenko V. V., Nikulin A. V. Connection of angular dimensions of simulated distributed objects with parameters of distribution of their angular noise. Voprosy radioelektroniki, 2019, no. 4, pp. 36–41. DOI 10.21778/2218-5453-2019-4-36-41*

V. V. Artyushenko, A. V. Nikulin

## CONNECTION OF ANGULAR DIMENSIONS OF SIMULATED DISTRIBUTED OBJECTS WITH PARAMETERS OF DISTRIBUTION OF THEIR ANGULAR NOISE

Fluctuations of the apparent center of radiation near their expectation during the irradiation of distributed objects with probing signals from radar stations have been observed by scientists for many decades. An expression describing the statistical nature of such fluctuations is known in the literature. These fluctuations are called angular noise. With all this, there is still no expression connecting the angular dimensions of the object and the distribution parameters of its angular noise. This expression is necessary to predict the angular size of distributed objects in problems of simulating reflections from them. In the article, the problem indicated above is solved in two ways. When using the first method, it is possible to obtain an unambiguous relationship between the angular size of the object and the distribution parameters of its angular noise, but for each new object it is necessary to re-derive this relationship, which is not always possible. When using the second method, the probability is used with which the fluctuating apparent center of radiation of a signal reflected from a distributed object falls within the boundaries of this object. This method has no disadvantage of the first one. The results presented in this article were confirmed by means of mathematical modeling.

**Keywords:** semi-natural modeling, reflections from the Earth's surface, radar systems, angular noise

## REFERENCES

1. Ostrovityanov R. V., Basalov F. A. *Statisticheskaya teoriya radiolokacii protyazhennykh celej* [The statistical theory of extended targets radar]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1982, 232 p. (In Russian).
2. Tverskoy G. N., Terentyev I. P., Kharchenko G. K. *Imitatory ekhosignalov sudovykh radiolokatsionnykh stantsii* [Ship radar echo simulators]. Leningrad, Sudostroyeniye Publ., 1973, 224 p. (In Russian).
3. Skolnik M. I. *Radar Handbook*. 3<sup>rd</sup> ed. New York, McGraw Hill, 2008, 1352 p.
4. Zubkovich S. G. *Statisticheskie harakteristiki signalov, otrazhennykh ot zemnoj poverhnosti* [Statistical characteristics of signals reflected from the earth's surface.]. Moscow, Sov. radio Publ., 1968, 224 p. (In Russian).
5. Kiselev A. V., Nikulin A. V. Algorithm of two-point distributed object model synthesis. Proceedings of the 16<sup>th</sup> International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2015. IEEE, pp. 158–161.
6. Kiselev A. V., Podkopaev A. O., Stepanov M. A. On the equivalence of a two-point partially coherent geometric model and a three-point incoherent one. *Radiopromyshlennost*, 2018, no. 1, pp. 62–67. (In Russian).
7. Artyushenko V. V., Kiselev A. V., Nikulin A. V., Stepanov M. A. Spectral method of synthesis of geometric models of surface-distributed objects. Proceedings of 19<sup>th</sup> international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2018. Erlagol, Altai, 29 June – 3 July 2018. IEEE Computer Society, pp. 98–103.
8. Ursatev A. A., Pogrebnyaya N. P. Semisignature model of signal-interfering radiolocation environment. *Upravlyaemye sistemy i mashiny*, 1991, no. 4, pp. 102–111. (In Russian).
9. Aliev A., Mishchenkova O. *Matematicheskoe modelirovanie v tekhnike* [Mathematical modeling in technology]. Moscow, Institut kompyuternykh issledovaniy Publ., 2012, 476 p. (In Russian).
10. Kanashchenkov A. I., Merkulov V. I. Radiolokatsionnye sistemy mnogofunktsionalnykh samoletov. Vol. 1. *RLS – informatsionnaya osnova boevykh deistvii mnogofunktsionalnykh samoletov. Sistemy i algoritmy pervichnoi obrabotki radiolokatsionnykh signalov* [Radar as an information basis for the multifunctional aircraft combat. Systems and algorithms for primary processing of radar signals]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006, 656 p. (In Russian).
11. Shepel V. N. Algorithm for determining the empirical density function for a sample of the general population. (Conference proceedings) VIII Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Sovremennyye informatsionnye tekhnologii v nauke i praktike». Orenburg, IPK GOU OGU, 2009, pp. 224–226. (In Russian).
12. Shepel V. N., Akimov S. S. Modernization of the histogram method to identify whether an unknown dataset belongs to a certain probability distribution law. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, no. 9, pp. 179–181. (In Russian).
13. Shepel V. N. The procedure for constructing a sample analogue of the density function. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 2, pp. 320–322. (In Russian).

## AUTHORS

**Artyushenko Vadim**, Ph. D., assistant professor, Department of Radio receivers and radio transmitters, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marks av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, tel.: +7 (383) 346-15-46, e-mail: artushenkomail@mail.ru.

**Nikulin Andrey**, Ph. D., associate professor, Department of Radio receivers and radio transmitters, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marks av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, tel.: +7 (383) 346-15-46, e-mail: nil\_rtu@ngs.ru.