

УДК: 621.396.01

**ДВУМЕРНАЯ ЧАСТИЧНО КОГЕРЕНТНАЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ
МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕННОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБЪЕКТА****А.В. Киселев, Т.И. Сабитов, М.А. Степанов***Новосибирский государственный технический университет*

В работе рассмотрена возможность замещения двумерного распределенного объекта четырехточечной частично когерентной моделью. В качестве критерия адекватности модели выбрано совпадение функций распределения шумов угловых координат для модели и замещаемого объекта. Показано, что предложенная четырехточечная конфигурация может быть представлена как две ортогональные эквивалентные двухточечные модели. Получены соотношения, связывающие параметры сигналов эквивалентных моделей с параметрами сигналов четырехточечной конфигурации. Под этими параметрами подразумеваются отношения мощностей сигналов и коэффициенты корреляционной матрицы. Показано, что для задаваемых параметров совместного распределения азимутальных и угломестных шумов могут быть рассчитаны параметры сигналов эквивалентных двухточечных моделей. Эти параметры используются для получения значений мощностей и коэффициентов корреляционной матрицы двумерной четырехточечной модели. Осуществлена апробация полученных результатов с помощью численных экспериментов для задаваемых тестовых значений параметров функции распределения угловых шумов. Формирование отсчетов сигналов, корреляционная матрица которых имеет требуемый вид, осуществлялось с помощью корреляционного метода линейного преобразования. Оценки параметров функции распределения выборки, полученной с помощью пеленгационного соотношения, получены методом моментов. Результаты численных экспериментов подтверждают достоверность полученных соотношений. Они могут быть использованы при математическом и имитационном моделировании распределенных радиолокационных объектов.

Ключевые слова: распределенный объект, шумы угловых координат, функция распределения, моделирование.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-28-36

Введение

В настоящее время лабораторные испытания радиолокационных станций (РЛС) осуществляются с помощью матричных имитаторов [1, 2]. Они предоставляют возможности имитации электромагнитных полей на апертуре антенны РЛС, соответствующих отражениям сигналов от различных целей. Перемещение имитируемой цели осуществляется электронным способом. При этом имитаторы позволяют учитывать амплитудные и доплеровские флуктуации, временное рассеяние, а также угловые шумы (УШ) протяженных объектов.

Явление УШ имеет место при зондировании распределенных объектов и может быть объяснено на основе их многоточечной модели. Близко расположенные элементарные отражающие элементы объекта дают излучение светящейся точки. Этот сигнал имеет нормальное распределение мгновенных значений. Распределенный объект представляется в виде совокупности светящихся точек и при анализе замещается соответствующей многоточечной моделью. Количество точек модели может варьироваться от нескольких десятков до нескольких тысяч. Неразрешаемые антенной РЛС светящиеся точки наблюдаются как кажущийся центр излучения (КЦИ). Координаты КЦИ принимаются в качестве оценки местоположения объекта. Флуктуации фазового фронта, вызванные флуктуациями сигналов

светящихся точек (например, в результате взаимного движения объекта и РЛС), приводят к блужданиям КЦИ, которые и представляют собой УШ [3].

Функция распределения (ПРВ) УШ [3]:

$$W(\xi) = \mu \sqrt{2 \left(1 + \mu^2 (\xi - m)^2\right)^{3/2}}, \quad (1)$$

где m – математическое ожидание блужданий КЦИ; μ – параметр, от которого зависит ширина распределения; ξ – обобщенная угловая координата (например, азимут или угол места), определяемая как отношение тангенса угла отклонения КЦИ от геометрического центра объекта к половине углового размера объекта.

Параметры m и μ распределения (1) характеризуют угловое положение объекта и его угловой размер соответственно.

Для имитации отражений от радиолокационных объектов используют малоточечные геометрические модели, где точка модели соответствует излучателю матричного имитатора. Замещение сложной многоточечной структуры происходит за счет распределения мощностей между излучателями сигналов [1, 2].

Ранее авторами работы была рассмотрена возможность замещения одномерного распределенного объекта двухточечной частично когерентной моделью [4]. Излучаемые сигналы – коррелированные случайные нормальные процессы. Были получены соотношения для расчета параметров излучаемых сигналов при заданных параметрах плотности распределения вероятности (ПРВ) моделируемых УШ.

Соотношения для расчета параметров сигналов двухточечной модели [4]:

$$\gamma = \operatorname{tg} \left[\frac{1}{2} \arccos \left(\frac{-2m\mu^2}{1 + m^2\mu^2 + \mu^2} \right) \right], \quad (2)$$

$$\rho = \frac{\mu^2 - 1 - m^2\mu^2}{(1 + m^2\mu^2 + \mu^2) \sqrt{1 - \left(\frac{-2m\mu^2}{1 + m^2\mu^2 + \mu^2} \right)^2}}, \quad (3)$$

где γ^2 – отношение мощностей сигналов; ρ – коэффициент взаимной корреляции сигналов.

В данной работе авторами предлагается развить ранее полученные результаты для двумерного частично когерентного моделирования УШ. Цель работы – получить соотношения для расчета параметров сигналов двумерной частично когерентной модели, обеспечивающей адекватное замещение распределенного объекта.

1. Теория

Адекватная двумерная модель должна обеспечивать равенство параметров двумерной функции распределения моделируемых УШ с соответствующими параметрами для замещаемого объекта. Совместная ПРВ азимутальных и угломестных шумов имеет вид [3]

$$W(\xi_x, \xi_y) = \frac{\mu_x \mu_y}{\pi \left(1 + \mu_x^2 (\xi_x - m_x)^2 + \mu_y^2 (\xi_y - m_y)^2\right)^2}, \quad (4)$$

где m_i , μ_i и ξ_i имеют тот же смысл, что и для одномерного распределения (1).

Рассмотрим конфигурацию из четырех излучателей коррелированных случайных сигналов (рис. 1). Излучатели модели расположены в одной плоскости в углах прямоугольника. Координаты излучателей в декартовой системе координат: $(x_1, y_1) = (1, 1)$, $(x_2, y_2) = (-1, 1)$, $(x_3, y_3) = (1, -1)$, $(x_4, y_4) = (-1, -1)$.

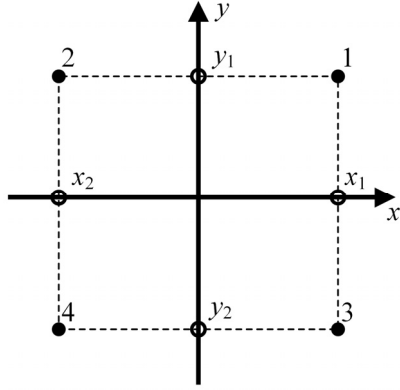


Рис. 1 – Четырехточечная двумерная частично когерентная модель распределенного объекта

Fig. 1. A four-point two-dimensional partially coherent model of a distributed object

Проекции излучающих точек на два взаимно ортогональных направления обобщенной координаты ξ (направления, совпадающие с осью OX и осью OY соответственно) образуют двухточечные модели-проекции. Параметры моделей-проекций следующие.

Модель, ориентированная по оси OX :

$$\begin{cases} \sigma_{x1}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_3^2 + 2\rho_{13}\sigma_1\sigma_3, \\ \sigma_{x2}^2 = \sigma_2^2 + \sigma_4^2 + 2\rho_{24}\sigma_2\sigma_4. \end{cases} \quad (5)$$

Модель, ориентированная по оси OY :

$$\begin{cases} \sigma_{y1}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2\rho_{12}\sigma_1\sigma_2, \\ \sigma_{y2}^2 = \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + 2\rho_{34}\sigma_3\sigma_4. \end{cases} \quad (6)$$

где ρ_{ij} – коэффициент взаимной корреляции сигналов, излучаемых из i -й и j -й точек модели.

Синтез двухточечных моделей-проекций (расчет дисперсий излучаемых сигналов σ_{x1}^2 , σ_{x2}^2 , σ_{y1}^2 и σ_{y2}^2 и коэффициентов взаимной корреляции ρ_x и ρ_y) можно проводить по соотношениям (2) и (3). В соответствии с (5) и (6) сигналы излучающих точек моделей-проекций – это сумма сигналов двух реальных точек.

Коэффициенты взаимной корреляции сигналов излучателей, формирующих излучение двухточечной модели-проекции, можно положить равными друг другу и определить следующим образом:

$$\rho_{12} = \rho_{34} = \rho_x, \quad \rho_{13} = \rho_{24} = \rho_y, \quad (7)$$

где ρ_x и ρ_y – коэффициенты взаимной корреляции сигналов двухточечных моделей-проекций.

Аналогичным образом можно обозначить отношение среднеквадратичных отклонений (СКО) двухточечных моделей:

$$\gamma_x = \frac{\sigma_{x1}}{\sigma_{x2}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{\sigma_3}{\sigma_4}, \quad \gamma_y = \frac{\sigma_{y1}}{\sigma_{y2}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{\sigma_2}{\sigma_4}. \quad (8)$$

Допущения в виде соотношений (7) и (8) не являются противоречивыми и позволяют значительно упростить расчет параметров сигналов. Покажем справедливость записанных равенств.

Рассмотрим горизонтально ориентированную двухточечную модель-проекцию. В соответствии с (5) отношение СКО сигналов:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{x1}^2}{\sigma_{x2}^2} &= \frac{\sigma_1^2 + \sigma_3^2 + 2\rho_{13}\sigma_1\sigma_3}{\sigma_2^2 + \sigma_4^2 + 2\rho_{24}\sigma_2\sigma_4} = \frac{\sigma_3^2 \left(\sigma_1^2 / \sigma_3^2 + 1 + 2\rho_{13}\sigma_1 / \sigma_3 \right)}{\sigma_4^2 \left(\sigma_2^2 / \sigma_4^2 + 1 + 2\rho_{24}\sigma_2 / \sigma_4 \right)} = \\ &= \left| \begin{array}{cc} \sigma_1 & \sigma_2 \\ \sigma_3 & \sigma_4 \\ \rho_{13} & \rho_{24} \end{array} \right| = \frac{\sigma_3^2}{\sigma_4^2} = \gamma_x^2. \end{aligned}$$

Полученное равенство верно с учетом (7) и (8). Запишем теперь выражение для коэффициента корреляции и произведем преобразования, учитывая (7) и (8):

$$\begin{aligned} \frac{M[S_{x1}S_{x2}]}{\sigma_{x1}\sigma_{x2}} &= \frac{M[(S_1 + S_3)(S_2 + S_4)]}{\sigma_{x1}\sigma_{x2}} = \\ &= \frac{\rho_x\sigma_1\sigma_2 + \rho_x\rho_y\sigma_1\sigma_4 + \rho_x\rho_y\sigma_3\sigma_2 + \rho_x\sigma_3\sigma_4}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_3^2 + 2\rho_y\sigma_1\sigma_3} \sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_4^2 + 2\rho_y\sigma_2\sigma_4}} = \\ &= \rho_x \frac{\sigma_1\sigma_2 + \rho_y\sigma_1\sigma_4 + \rho_y\sigma_3\sigma_2 + \sigma_3\sigma_4}{\frac{\sigma_1}{\sigma_2}(\sigma_2^2 + \sigma_4^2 + 2\rho_y\sigma_2\sigma_4)} = \\ &= \rho_x \frac{\sigma_1\sigma_2 + 2\rho_y\sigma_1\sigma_4 + \sigma_3\sigma_4}{\sigma_1\sigma_2 + \sigma_3\sigma_4 + 2\rho_y\sigma_1\sigma_4} = \rho_x. \end{aligned}$$

Выражение для коэффициента корреляции также верно. Аналогичные выкладки можно привести и для вертикально ориентированной модели-проекции. Делаем вывод о допустимости использования (7) и (8).

Выражения (5)–(8) позволяют найти соотношения для расчета СКО сигналов излучателей четырехточечной двумерной модели для обеспечения требуемых параметров ПРВ моделируемых УШ:

$$\sigma_1 = \gamma_y \sqrt{\frac{\sigma_{x1}^2}{\gamma_y^2 + 1 + 2\rho_y\gamma_y}}, \quad \sigma_2 = \frac{\sigma_1}{\gamma_x}, \quad \sigma_3 = \frac{\sigma_1}{\gamma_y}, \quad \sigma_4 = \frac{\sigma_1}{\gamma_x\gamma_y}. \quad (9)$$

2. Апробация результатов

Апробация результатов осуществлялась с помощью численных экспериментов. Задавались тестовые значения параметров ПРВ моделируемых УШ.

По задаваемым параметрам ПРВ УШ производился расчет коэффициентов корреляции и СКО излучаемых сигналов по соотношениям (2), (3) и (9).

Сперва формировались отсчеты четырех не коррелированных реализаций комплексного случайного процесса $\dot{n}_k(t) = i_k(t) + jq_k(t)$, где k – порядковый номер реализации; $i(t)$ и $q(t)$ – нормальные случайные процессы с нулевым мат. ожиданием и единичной дисперсией; t – порядковый номер отсчета.

Для получения отсчетов реализаций с требуемыми значениями коэффициентов взаимной корреляции использовался корреляционный метод линейного преобразования [5]:

$$\dot{y}(t) = A \cdot \dot{n}(t).$$

Переходная матрица имеет вид

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix},$$

где элементы матрицы [5]:

$$\begin{aligned} a_{11} &= 1, & a_{21} &= \rho_{21}, & a_{22} &= \sqrt{\rho_{22} - a_{21}^2}, & a_{31} &= \rho_{31}, & a_{32} &= \frac{\rho_{32} - a_{21}a_{31}}{a_{22}}, \\ a_{33} &= \sqrt{\rho_{33} - a_{31}^2 - a_{32}^2}, & a_{41} &= \rho_{41}, & a_{42} &= \frac{\rho_{42} - a_{21}a_{41}}{a_{22}}, & a_{43} &= \frac{\rho_{43} - a_{31}a_{41} - a_{32}a_{42}}{a_{33}}, \\ a_{44} &= \sqrt{\rho_{44} - a_{41}^2 - a_{42}^2 - a_{43}^2}. \end{aligned}$$

Полученные реализации с заданными взаимными коэффициентами корреляции использовались для получения отсчетов комплексной амплитуды сигнала, излучаемого из k -й точки модели по соотношению

$$\dot{S}_k(t) = \sigma_k \dot{y}_k(t).$$

Положение точки КЦИ определялось с помощью соотношения для моноимпульсной пеленгации [6]:

$$F(t) = \operatorname{Re} \left(\frac{\Delta(t)}{\Sigma(t)} \right),$$

где $\Delta(t)$ – отсчет сигнала, принятого моделью разностной диаграммы направленности пеленгатора; $\Sigma(t)$ – отсчет сигнала, принятого моделью суммарной диаграммы направленности пеленгатора.

Оценка параметров функции распределения моделируемых УШ осуществлялась по соотношениям [3, 7]:

$$m' = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N F(t), \quad \mu' = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |F(t) - m'|}.$$

Результаты моделирования (100 тыс. отсчетов для одной реализации) сведены в таблицу (табл. 1). Для эксперимента № 1 из табл. 1 представлены графики требуемой ПРВ и гистограмма моделируемых флуктуаций КЦИ, полученная в результате усреднения по 20 реализациям (рис. 2 и 3).

Таблица 1 / Table 1

Результаты численных экспериментов
Results of numerical experiments

№	Задаваемые параметры ПРВ УШ				Оценки параметров ПРВ моделируемых УШ			
	m_x	μ_x	m_y	μ_y	m'_x	μ'_x	m'_y	μ'_y
1	0,5	2	0	1	0,498	2,012	0,016	0,992
2	-0,2	0,7	0,4	1	-0,21	0,703	0,406	1,006
3	-0,5	4	-0,6	2,7	-0,499	4,014	-0,6	2,684
	Параметры модели							
	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	ρ_x	ρ_y		
1	1,581	0,707	1,581	0,707	0,447	0		
2	0,755	0,86	0,512	0,583	-0,354	-0,08		
3	0,1	0,273	0,302	0,821	0,808	0,562		

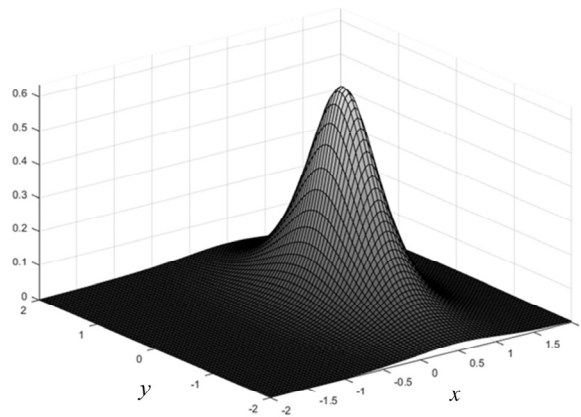


Рис. 2 – Задаваемая ПРВ УШ

Fig. 2 – The required distribution function of an angle noise

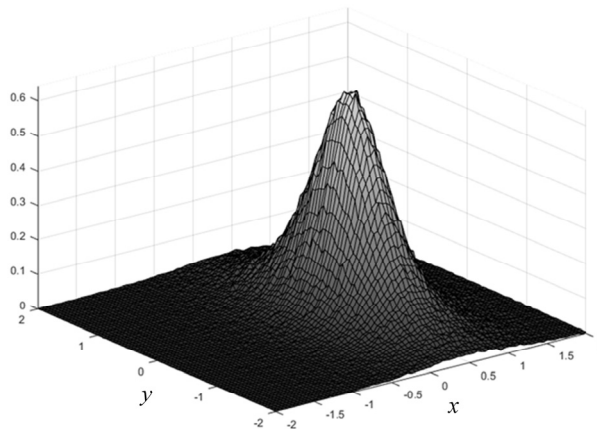


Рис. 3 – Гистограмма флуктуаций КЦИ

Fig. 3 – The histogram of fluctuations of the apparent radiation center

Как видно из таблицы и рисунков, полученные в результате численных экспериментов оценки параметров ПРВ УШ соответствуют задаваемым величинам, что указывает на достоверность полученных результатов.

Заключение

Данная работа является развитием ранее полученных результатов для одномерной двухточечной частично когерентной модели. Результат работы – соотношения для расчета параметров сигналов четырехточечной двумерной частично когерентной модели. Достоверность полученных соотношений была подтверждена с помощью численных экспериментов. Полученные результаты могут быть использованы для разработки геометрических моделей распределенных радиолокационных объектов при математическом или имитационном моделировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Analysis and correction of triad field angle error in array radio frequency simulation / L. Hua, Z. Jianjiang, P. Minghai, Z. Hanwu // *Future Communication, Computing, Control and Management*. – 2012. – Vol. 2. – P. 125–134.
2. **Киселев А.В., Тырыкин С.В.** Малоточечная модель фрагмента неоднородной поверхности Земли // *Вопросы радиоэлектроники*. – 2016. – Вып. 4. – С. 32–40.
3. **Островитянов Р.В., Басалов Ф.А.** Статистическая теория радиолокации протяженных целей. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.
4. **Сабитов Т.И., Киселев А.В., Степанов М.А.** Модель распределенного радиолокационного объекта, составленного из излучателей коррелированных сигналов // *Вопросы радиоэлектроники*. – 2017. – Вып. 4. – С. 40–43.
5. **Быков В.В.** Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. – М.: Советское радио, 1971. – 328 с.
6. **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.
7. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1973. – 832 с.

A TWO-DIMENSIONAL PARTIALLY COHERENT GEOMETRIC MODEL OF A DISTRIBUTED RADAR OBJECT

Kiselev A.V., Sabitov T.I., Stepanov M.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The possibility of the substitution of a two-dimensional distributed radar object by a 4-point partly coherent model is considered. As a criterion of adequacy we accepted the coincidence of the angle noise distribution function for the model and the substituted object. It is shown that the proposed four-point configuration can be represented as two orthogonal equivalent two-point models. Relations are obtained for calculating the parameters (power ratios of the signals and coefficients of the correlation matrix) of the signals of the four-point model through the parameters of the signals of the equivalent two-point models. The signal parameters of the equivalent two-point models can be calculated for the given parameters of the joint distribution of azimuthal and elevation noises. These relations obtained for the two-dimensional model are the result of this work. The results obtained were tested using numerical experiments for the test values of the parameters of the angle noise distribution function. To generate samples of signals whose correlation matrix has the required form the linear transformation method was used. The parameters of the distribution function of the simulated angle noise were estimated by the method of matching

moments. The results of numerical experiments confirm the reliability of the obtained ratios. They can be used in mathematical and simulation modeling of distributed radar objects.

Keywords: distributed object, angle noise, distribution function, simulation.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-28-36

REFERENCES

1. Hua L., Jianjiang Z., Minghai P., Hanwu Z. Analysis and correction of triad field angle error in array radio frequency simulation. *Future Communication, Computing, Control and Management*, 2012, vol. 2, pp. 125–134. DOI: 10.1007/978-3-642-27314-8_18.
2. Kiselev A.V., Tyrykin S.V. Malotochehnaya model' fragmenta neodnorodnoi poverkhnosti Zemli [Small quantity point model of non-uniform earth surface fragment]. *Voprosy radioelektroniki = Issues of radio electronics*, 2016, no. 4, pp. 32–40.
3. Ostrovityanov R.V., Basalov F.A. *Statisticheskaya teoriya radiolokatsii protyazhennykh tselei* [Statistical theory of extended radar targets]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 232 p.
4. Sabitov T.I., Kiselev A.V., Stepanov M.A. Model' raspredelennogo radiolokatsionnogo ob"ekta, sostavlenno iz izluchatelei korrelirovannykh signalov [Model of distributed radar object composed of emitters correlated signals]. *Voprosy radioelektroniki = Issues of radio electronics*, 2017, iss. 4, pp. 40–43.
5. Bykov V.V. *Tsifrovoye modelirovanie v statisticheskoi radiotekhnike* [Digital modeling in statistical radio engineering]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1971. 328 p.
6. Kanashchenkov A.I., Merkulov V.I. *Radiolokatsionnye sistemy mnogofunktional'nykh samoletov. T. 1. RLS – informatsionnaya osnova boevykh deistvii mnogofunktional'nykh samoletov. Sistemy i algoritmy pervichnoi obrabotki radiolokatsionnykh signalov* [Radar systems multipurpose aircraft. Vol. 1. Radar – information basis hostilities multipurpose aircraft. Systems and algorithms for primary processing of radar signals]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006. 656 p.
7. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 832 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Киселев Алексей Васильевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: моделирование сложной радиолокационной обстановки в реальном масштабе времени. Опубликовано более 150 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: nil_rtu@ngs.ru).

Kiselev Aleksey Vasil'evich Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Head of the Department of Radio Receiving and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests include real-time modeling of complex radar conditions. Over 150 scientific papers have been published. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nil_rtu@ngs.ru).



Сабитов Тимур Ильясович – магистрант, кафедра радиоприемных и радиопередающих устройств, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: радиолокация, имитационное моделирование. Опубликовано 6 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: sti0@mail.ru).

Sabitov Timur Ilyasovich – an undergraduate student, Department of Radio Receivers and Radio Transmitters, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on radiolocation, simulation modelling. He is the author of 6 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sti0@mail.ru).



Степанов Максим Андреевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: моделирование сложной радиолокационной обстановки в реальном масштабе времени. Опубликовано более 80 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: m.stepanov@corp.nstu.ru).

Stepanov Maksim Andreevich, Candidate of Sciences (Eng.), associate professor, associate professor at the Department of Radio Receivers and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests include real-time modeling of complex radar conditions. He has published over 80 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: m.stepanov@corp.nstu.ru).

Статья поступила 12 февраля 2020 г.

Received February 12, 2020

To Reference:

Kiselev A.V., Sabitov T.I., Stepanov M.A. Dvumernaya chastichno kogerentnaya geometricheskaya model' raspredelennogo radiolokatsionnogo ob"ekta [A two-dimensional partially coherent geometric model of a distributed radar object]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 1–2 (46–47), pp. 28–36 . DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-28-36.