

УДК 621.396.96

ЗАМЕЩЕНИЕ БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЫ ЭКВИВАЛЕНТНЫМ РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ОБЪЕКТОМ

А.В. Киселев¹, А.В. Фатеев², Р.Г. Захватихата¹

¹*Новосибирский государственный технический университет*

²*Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники*

Предложено рассматривать источники отражений полезного сигнала в безэховых камерах как блестящие точки распределенного объекта. При этом безэховая камера, по сути, замещается этим объектом. Это позволяет использовать теорию радиолокации протяженных целей для оценки достоверности имитационного моделирования сигналов и помех, проводимого в камере. С целью проверки целесообразности этого предположения рассмотрена простейшая ситуация, в которой безэховая камера содержит излучающую точку и единственный отражатель полезного сигнала, также представляемый точкой. Начальная фаза эхосигнала от этой точки считается случайной, равномерно распределенной в интервале $0 \dots 2\pi$. Интенсивность отражений принимается известной. Обе точки формируют сигнал от эквивалентного объекта, замещающего безэховую камеру. Для этого случая известны выражения для плотности распределения вероятностей положения кажущегося центра излучения, его математического ожидания и дисперсии. Анализ этих выражений показал, что кажущийся центр излучения может случайным образом изменять свое положение. Границы и дисперсия этих изменений определяются интенсивностью отражений. Также получены соотношения для расчета вероятности попадания положения кажущегося центра излучения в заданный интервал. В целом применение теории радиолокации протяженных целей к анализу влияния отражений в безэховой камере на точность установки углового положения точечного источника позволяет получить результаты, представляющие научный и практический интерес.

Ключевые слова: безэховая камера, замещение, распределенный излучающий объект, кажущийся центр излучения.

DOI: 10.17212/1727-2769-2025-3-18-28

Введение

В антенных измерениях и при проведении полунатурных испытаний радиоэлектронных систем (сокращенно РТС) широко используют лабораторные измерения. При этом исследуемая РТС помещается в безэховую камеру, а источники внешних сигналов имитируются с помощью точечного излучателя. Качество моделирования реальной радиоэлектронной обстановки в этом случае во многом определяется степенью безэховости камеры, которая отвечает за уровень сигналов, отраженных от ее элементов (пола, потолка, стен, оборудования и других объектов).

Традиционно качество безэховости камер, применяемых при измерении параметров и диаграмм направленности антенн, а также при имитации радиоэлектронной обстановки, оценивается уровнем отражений от ее поверхностей, а также от отражающих предметов, находящихся в ней. Вместе с тем получаемые оценки не позволяют непосредственно оценить влияние нежелательных отражений на результаты измерений или имитационного моделирования.

В работе рассмотрен иной подход к оценке влияния отражений.

В его основе лежит представление безэховой камеры с излучателем полезного сигнала и присущими ей отражениями в виде распределенного излучающего объекта. Излучатель полезного сигнала, точки и области формирования отраженных сигналов интерпретируются как блестящие точки или области на его поверхности. Как известно [1–4], в этом случае формируется так называемый кажущийся центр излучения (сокращенно КЦИ). Его положение отличается от положения точки размещения излучателя полезного сигнала.

Таким образом, влияние неидеальности безэховой камеры сводится к замене точечного излучателя полезного сигнала сложным распределенным излучающим объектом. Это позволяет использовать для анализа достоверности имитационного моделирования результаты теории радиолокации протяженных целей [5]. По сути, точечный излучатель вместе с камерой замещается распределенным объектом.

Вместе с тем сделанное предположение носит дискуссионный характер. В первую очередь, в силу неочевидности полезности применения к анализу безэховости камер теории радиолокации протяженных объектов.

Цель работы – применить результаты анализа шумов угловых координат протяженных радиолокационных объектов для оценки влияния отражений в безэховой камере на характеристики имитируемого точечного объекта и оценить эффективность этого подхода.

Для простейшей ситуации, наличия в камере единственного точечного отражателя, рассмотрены вероятностные характеристики углового положения КЦИ:

- плотность распределения вероятности положения КЦИ;
- его математическое ожидание и дисперсия;
- вероятности отклонения положения КЦИ от положения излучателя полезного сигнала на заданную величину.

1. Постановка задачи

Рассмотрим простейшую ситуацию.

Пусть в безэховой камере имеет место точечный излучатель полезного сигнала и единственная точка, соответствующая его отражению от элементов камеры (рис. 1).

На рисунке использована нормировка координат. Она выполнена к величине, равной половине расстояния между точками. Начало отсчета – в центре между ними.

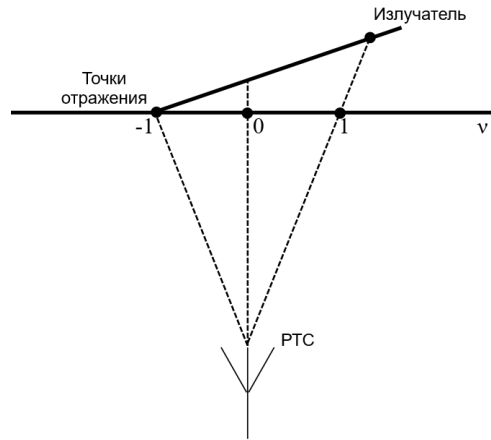


Рис. 1 – Представление безэховой камеры в виде двухточечного объекта

Fig. 1 – Representation of an anechoic chamber as a two-point object

Таким образом, в точке расположения фазового центра приемной антенны РТС мы имеем сигнал, представляющий собой сумму двух сигналов, отличающихся амплитудами, начальными фазами, задержками и угловыми положениями точек излучения. В силу малости разницы задержек сигналов будем пренебрегать. Кроме того, предположим, что разнос точек имеет место по одной угловой координате. Не снижая общности это позволит упростить решаемую задачу.

Рассмотрим случай, имеющий место в реальных условиях.

Пусть отношение амплитуд сигналов (отраженного и полезного в точке расположения фазового центра антенны исследуемой РТС) детерминировано. Обозначим его z_0 ($0 < z_0 < 1$). Разность фаз между сигналами (обозначим ее $\Delta\varphi$) положим случайной, равновероятно распределенной в интервале $0 \dots 2\pi$.

2. Решение

Воспользуемся теорией радиолокации протяженных целей. Точнее известными [5] результатами анализа шумов их угловых координат.

Тогда для детерминированной отражающей способности точки, формирующей отраженный сигнал, плотность распределения вероятности положения кажущегося центра излучения (обозначим его v) будет подчинена закону [5]:

$$W(v, z_0) = \frac{1}{\pi v \sqrt{\left(\frac{1+z_0}{1-z_0} - v\right) \left(v - \frac{1-z_0}{1+z_0}\right)}}. \quad (1)$$

Результаты ее расчетов приведены на рис. 2.

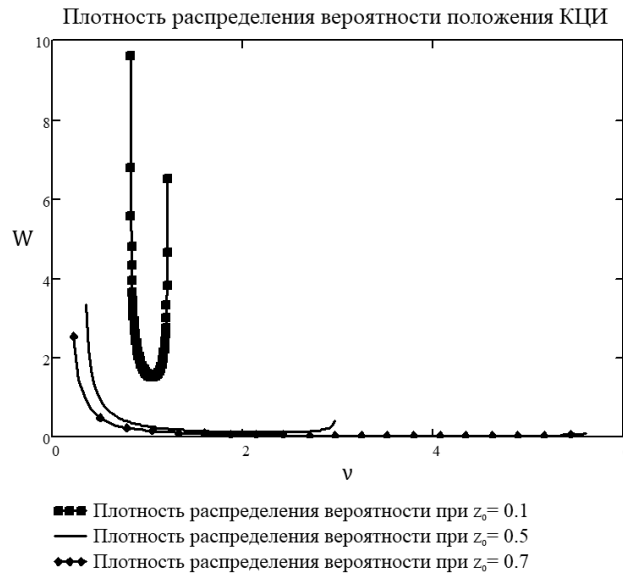


Рис. 2 – Плотность вероятности распределения положения КЦИ в зависимости от $z_0 = 0,1, 0,5, 0,7$

Fig. 2 – Probability density of the ARC position distribution depending on $z_0 = 0.1, 0.5, 0.7$

Проанализируем представленную зависимость.

Как и значения разности фаз сигналов, положение КЦИ становится случайным.

Его функция плотности распределения вероятности несимметрична.

Диапазон изменений положения КЦИ ограничен нижним $v_{\min}$ и верхним $v_{\max}$ пределами (рис. 3), зависящими от отношения амплитуд сигналов [5]:

$$v_{\min} = \frac{1 - z_0}{1 + z_0}; \quad v_{\max} = \frac{1 + z_0}{1 - z_0}. \quad (2)$$

При отсутствии отражений (для идеальной безэховой камеры) имеем область определения положения КЦИ, вырождающуюся в точку, положение которой совпадает с положением излучателя полезного сигнала. По мере роста уровня отражений область возможных значений положения КЦИ расширяется.

Математическое ожидание положения КЦИ согласно результатам известных исследований [5] совпадает с положением более мощного источника сигнала, что в нашем случае соответствует положению источника полезного сигнала ($v = 1$).

При этом положение наиболее вероятного значения (рис. 2) не совпадает с математическим ожиданием v .

Дисперсия v согласно [5]

$$D(z_0) = 2z_0^2 / (1 - z_0^2).$$

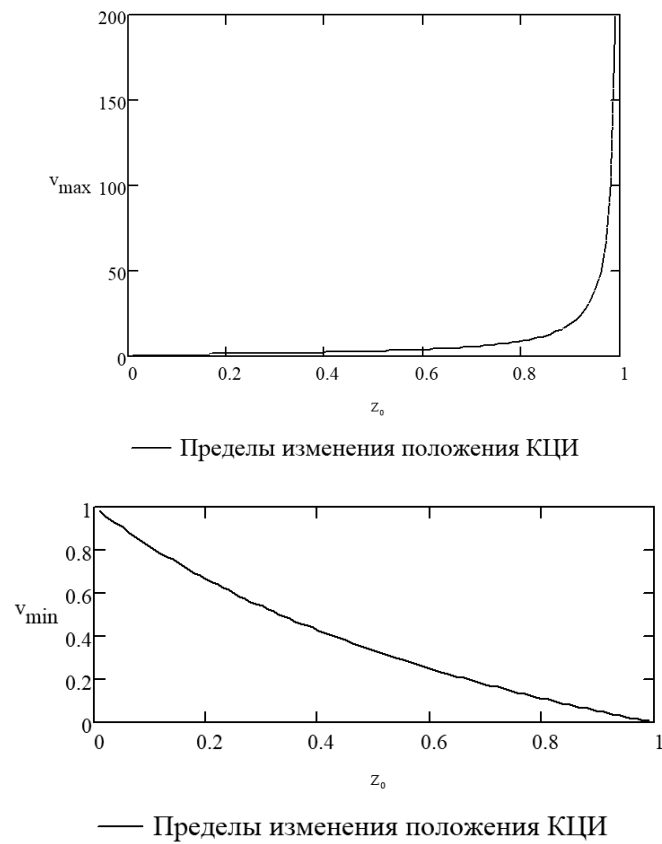


Рис. 3 – Пределы изменения положения КЦИ
в зависимости от z_0

Fig. 3 – Limits of the ARC position change depending on z_0

Результаты расчетов по приведенной зависимости представлены на рис. 4.

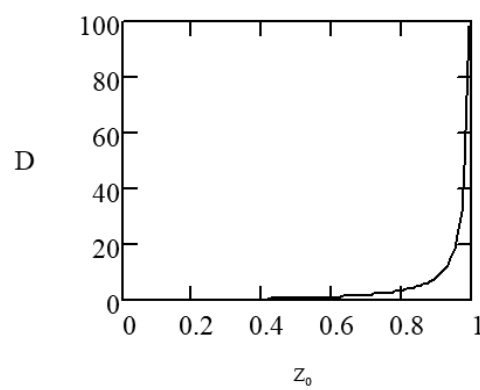


Рис. 4 – Зависимость дисперсии от z_0

Fig. 4 – Dependence of dispersion on z_0

Для $z_0 = 0$ имеем $D(0) = 0$. Для $z_0 = 1$ дисперсия ($D(1)$) стремится к бесконечности. В промежутке между граничными значениями z_0 разброс положения КЦИ монотонно растет с ростом z_0 , вплоть до бесконечности при равенстве амплитуд сигналов.

Диапазон возможных значений v можно разбить на две области, с соответствующими вероятностями попадания в них.

1. Для области $v_{\min} < v < 1$ имеем вероятность:

$$P_1(z_0) = \int_{-\infty}^1 W(v, z_0) dv = \frac{1}{\pi} \int_{v_{\min}}^1 \left(v \sqrt{\left(\frac{1+z_0}{1-z_0} - v \right) \left(v - \frac{1-z_0}{1+z_0} \right)} \right)^{-1} dv.$$

Или, после преобразований с использованием табличных интегралов [6]:

$$P_1(z_0) = \frac{1}{\pi} \arcsin \left(\frac{v_{\max} + v_{\min} - 2}{v_{\max} - v_{\min}} \right). \quad (3)$$

2. Для второй области $1 < v < v_{\max}$ получим:

$$\begin{aligned} P_2(z_0) &= \int_1^{v_{\max}} W(v, z_0) dv = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(\frac{v_{\max} + v_{\min} - 2}{v_{\max} - v_{\min}} \right) \right) = \\ &= 0,5 - \frac{1}{\pi} \arcsin \left(\frac{v_{\max} + v_{\min} - 2}{v_{\max} - v_{\min}} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Вероятность выхода положения КЦИ за $v_{\text{гр}}$ для области $v > 1$ (отклонения положения КЦИ вправо (рис. 1) от положения излучателя полезного сигнала):

$$\begin{aligned} P(v_{\text{гр}}, z_0) &= 1 - \int_{-\infty}^{v_{\text{гр}}} W(v, z_0) dv = \\ &= 1 - \frac{1}{\pi} \int_{v_{\min}}^{v_{\text{гр}}} \left(v \sqrt{\left(\frac{1+z_0}{1-z_0} - v \right) \left(v - \frac{1-z_0}{1+z_0} \right)} \right)^{-1} dv. \end{aligned} \quad (5)$$

Решение интеграла (5):

$$P(v_{\text{гр}}, z_0) = 1 - \frac{1}{\pi} \arcsin \left(\frac{v_{\text{гр}}(v_{\max} + v_{\min}) - 2}{v_{\text{гр}}(v_{\max} - v_{\min})} \right). \quad (6)$$

Вероятность выхода положения КЦИ влево (рис. 1 и 2) от положения излучателя полезного сигнала $v < 1$ (т. е. для второй области):

$$\begin{aligned}
 P(v_{\text{ГР}}, z_0) &= \int_{-\infty}^{v_{\text{ГР}}} W(v, z_0) dv = \\
 &= \frac{1}{\pi} \int_{v_{\text{мин}}}^{v_{\text{ГР}}} \left(v \sqrt{\left(\frac{1+z_0}{1-z_0} - v \right) \left(v - \frac{1-z_0}{1+z_0} \right)} \right)^{-1} dv. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Решение интеграла (7):

$$P(v_{\text{ГР}}, z_0) = \frac{1}{\pi} \arcsin \left(\frac{v_{\text{ГР}}(v_{\text{макс}} + v_{\text{мин}}) - 2}{v_{\text{ГР}}(v_{\text{макс}} - v_{\text{мин}})} \right). \quad (8)$$

Результаты расчетов по полученным формулам представлены на рис. 5.

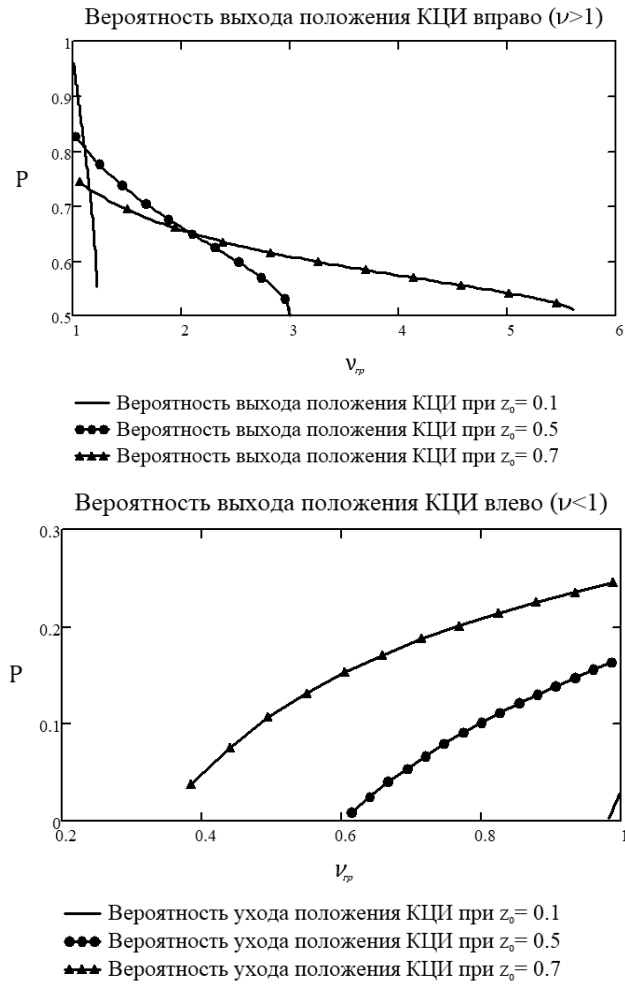


Рис. 5 – Вероятности выхода положения КЦИ влево, вправо

Fig. 5 – Probabilities of the ARC position exit to the left, to the right

Из представленных результатов видно, что вероятность выхода за пределы, превышающие разнос точек, весьма велика (для $z_0 \geq 0,5$ и $v > 1$ превышает 0,65, рис. 5). То есть при значительном уровне отраженного сигнала положение кажущегося центра излучения может значительно отличаться от положения источника полезного сигнала.

В целом при наличии в безэховой камере точечного отражателя, дающего эхосигнал со случайной начальной фазой, получаем следующее.

Положение КЦИ становится случайным. Диапазон его возможных значений зависит от уровня отраженного сигнала и может существенно выходить за рамки, ограниченные положением точек.

Наиболее вероятное положение КЦИ не совпадает с его математическим ожиданием.

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

При наличии в безэховой камере отражающих элементов вместо точки излучения полезного сигнала следует говорить о кажущемся центре излучения. При случайных параметрах отраженных сигналов его положение будет случайным.

Наличие в камере отражений приводит к тому, что положение точки излучения полезного сигнала будет измеряться РТС со случайной ошибкой.

При этом его наиболее вероятные значения не будут совпадать ни с истинным положением излучателя полезного сигнала, ни с положением точки, формирующей отраженный сигнал.

Для детерминированной отражающей способности точки отражений, пределы изменения положения ограничены соотношениями (2) и определяются отношением амплитуд полезного и отраженного сигналов в точке положения фазового центра антенны исследуемой РТС.

Вероятности выхода положения КЦИ за заданные пределы определяются найденными выражениями (3)–(8), что позволяет использовать эти выражения для формирования требований к допустимому уровню отражений от элементов камеры (уровню ее безэховости).

В целом представление безэховой камеры как распределенного радиолокационного объекта представляется целесообразным и весьма перспективным.

Это определяется тем, что оно позволяет оценить влияния отражений на достоверность имитации углового положения излучающих объектов, т. е. на достоверность их полунатурного моделирования. Кроме того, позволяет проводить оценку допустимого уровня отражений от элементов безэховой камеры, исходя из допустимых ошибок имитации углового положения имитируемых точечных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Штагер Е.А.** Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. – М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.
2. **Buckley E.F.** Microwave reflectivity measurement: Theory and practice // *Electronic Design (Microwaves)*. – 1962. – March 15. – P. 12–19.
3. **Buckley E.F.** Design evaluation and performance modern microwave anechoic chambers for antenna measurements // *Electronic Components*. – 1965. – Vol. 6 (12). – P. 1119–1126.
4. Emerson and Cuming Inc. «Free Space Microwave Absorbers».
5. **Островитянов Р.В., Басалов Ф.А.** Статистическая теория радиолокации протяженных целей. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.
6. **Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И.** Интегралы и ряды. – М.: Наука, 1981.

REPLACEMENT OF AN ANECHOIC CHAMBER WITH AN EQUIVALENT DISTRIBUTED OBJECT**Kiselev A.V.¹, Fateev A.V.², Zakhvatikhata R.G.¹**¹*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*²*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia*

It is proposed to consider the sources of useful signal reflections in anechoic chambers as shiny points of a distributed object. In this case, the anechoic chamber is essentially replaced by this object. This allows using the theory of extended target radar to assess the reliability of simulation modeling of signals and interference conducted in the chamber. In order to verify the appropriateness of this assumption, the simplest situation is considered, in which the anechoic chamber contains a radiating point and a single reflector of the useful signal represented by a point. The initial phase of the echo signal from this point is considered random, equally likely distributed in the interval $0-2\pi$. The reflection intensity is assumed to be known. Both points form a signal from an equivalent object replacing the anechoic chamber. For this case, expressions are known for the probability distribution density of the apparent radiation center position, its mathematical expectation and variance. Analysis of these expressions showed that the apparent radiation center can randomly change its position. The boundaries and dispersion of these changes are determined by the intensity of reflections. Relationships for calculating the probability of the position of the apparent radiation center falling within a given interval are also obtained. In general, the application of the theory of extended target radar to the analysis of the influence of reflections in an anechoic chamber on the accuracy of determining the angular position of a point source allows for the obtaining of results of scientific and practical interest.

Keywords: anechoic chamber, replacement, distributed radiating object, apparent radiation center.

DOI: 10.17212/1727-2769-2025-3-18-28

REFERENCES

1. Shtager E.A. *Rasseyanie radiovoln na telakh slozhnoi formy* [Scattering of radio waves on bodies of complex shape]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986. 184 s.
2. Buckley E.F. Microwave reflectivity measurement: Theory and practice. *Electronic Design (Microwaves)*, 1962, March 15, pp. 12–19.
3. Buckley E.F. Design evaluation and performance modern microwave anechoic chambers for antenna measurements. *Electronic Components*, 1965, vol. 6 (12), pp. 1119–1126.
4. Emerson and Cuming Inc. "Free Space Microwave Absorbers".
5. Ostrovityanov R.V., Basalov F.A. *Statisticheskaya teoriya radiolokatsii protyazhennykh tselei* [Statistical theory of extended objectives radar]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 232 p.
6. Prudnikov A.P., Brychkov Yu.A., Marichev O.I. *Integraly i ryady* [Integrals and series]. Moscow, Nauka Publ., 1981.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Киселев Алексей Васильевич – родился в 1958 году, д-р техн. наук, профессор кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: имитационное моделирование сложной радиоэлектронной обстановки, радиолокация, радиосвязь. Имеет более 200 публикаций. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: nil_rtu@mail.ru).

Alexey Vasilevich Kiselev (b. 1958) – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the Department of Radio Receiving and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on simulation of complex electronic environment, radar detecting and ranging, and radio communication. He is the author of over 200 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: nil_rtu@mail.ru).



Фатеев Алексей Викторович – родился в 1986 году, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой радиоэлектроники и систем связи Томского университета систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: СВЧ техника, измерения параметров антенн. Имеет более 50 научных работ. (Адрес: 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, д. 40. E-mail: fateev@tusur.ru).

Alexey Viktorovich Fateev (b. 1986) – Candidate of Sciences (Eng.), Head of the Department of Radioelectronics and Communication Systems, TUSUR. His research interests are currently focused on microwave electronics and antenna measurements. He is the author of more than 50 scientific papers. (Address: 40, Lenina Av., Tomsk, 634050, Russia, E-mail: fateev@tusur.ru).



Захватихата Роман Глебович – родился в 2005 году, студент Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: радиосвязь. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: mr.roman_z@mail.ru).

Roman Glebovich Zakhvatikhata (b. 2005) – a student at Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on radio communication. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: mr.roman_z@mail.ru).

Статья поступила 29 августа 2025 г.

Received August 29, 2025

To Reference:

Kiselev A.V., Fateev A.V., Zakhvatikhata R.G. Zameshchenie bezekhovoi kamery ekvivalentnym raspredelennym ob"ektom [Replacement of an anechoic chamber with an equivalent distributed object]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2025, no. 3 (68), pp. 18–28. DOI: 10.17212/1727-2769-2025-3-18-28.