

Для цитирования: Сабитов Т. И., Степанов М. А., Киселев А. В. Требования к точности задания параметров сигналов, излучаемых матричным имитатором // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 27–31. DOI 10.21778/2218-5453-2019-4-27-31 УДК 621.396.96

**Т. И. Сабитов<sup>1</sup>, М. А. Степанов<sup>1</sup>, А. В. Киселев<sup>1</sup>**

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

# ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ ЗАДАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ, ИЗЛУЧАЕМЫХ МАТРИЧНЫМ ИМИТАТОРОМ

*На примере двухточечной геометрической модели, к точкам которой подводятся коррелированные нормальные случайные процессы с заданными спектральными свойствами, рассмотрено влияние неточности задания параметров сигналов, излучаемых матричным имитатором, на ошибки моделирования угловых шумов. Ошибки моделирования оценивались как отклонения параметров плотности распределения вероятности углового шума от заданных значений. Получены соотношения, позволяющие оценить величину ошибок моделирования, вызванных неточным заданием параметров излучаемых сигналов. Установлено, что следствием ошибок задания уровней сигналов в первую очередь становится отклонение математического ожидания угловых шумов от заданного значения. Неточное задание коэффициента взаимной корреляции излучаемых сигналов приводит к изменению параметра ширины плотности распределения вероятности углового шума, то есть к ошибкам задания углового размера замещаемого объекта. Определены диапазоны углового положения и угловых размеров замещаемых объектов, в пределах которых требования к точности задания параметров сигналов, излучаемых матричным имитатором, минимальны.*

**Ключевые слова:** угловые шумы, точность моделирования, геометрическая модель

## Введение

В настоящее время актуальна задача моделирования отражений от радиолокационных объектов [1]. В силу распределенной структуры объектов фазовый фронт отраженной электромагнитной волны флуктуирует. Это приводит к флуктуациям измерения угловых координат объекта, называемым угловым шумом [2, 3]. Для их математического моделирования широко применяют геометрические модели, представляющие собой совокупность точек, не разрешаемых по угловым координатам и излучающих сигналы с заданными параметрами. При полунатурном и имитационном моделировании используются матричные имитаторы, базирующиеся на геометрических моделях объектов [4].

При построении матричного имитатора на основе любой из разработанных геометрических моделей каждая точка модели замещается антенной, излучающей сигналы с заданными параметрами. К этим параметрам относятся мощности излучаемых сигналов, коэффициенты их взаимной корреляции, а также спектральные свойства.

Очевидно, что неточность задания параметров сигналов, подводимых к излучателям матричного имитатора, повлечет за собой отклонение параметров формируемых угловых шумов модели от расчетных значений, в первую очередь параметров плотности распределения вероятности (ПРВ) угловых шумов.

Цель настоящей работы – оценить допустимые отклонения параметров сигналов, излучаемых матричным имитатором, при которых ошибка моделирования угловых шумов не превысит заданную.

## Определение требований к точности задания параметров излучаемых сигналов

Рассмотрим простейшую двухточечную геометрическую модель. Полученный результат может быть масштабирован на модель, составленную из любого количества точек. Наиболее общей является модель, излучающая коррелированные нормальные случайные процессы с заданной мощностью и спектрально-корреляционными свойствами. Такие модели получили название частично когерентных. При коэффициенте взаимной корреляции, равном нулю, данная модель переходит в полностью некогерентную, при единице – в полностью когерентную.

Для частично когерентной двухточечной модели распределенного объекта параметры распределения угловых шумов ( $m$  – математическое ожидание,  $\mu$  – параметр, характеризующий ширину распределения) определяются системой [2]:

$$\begin{cases} \frac{\gamma^2 - 1}{1 + 2r\gamma + \gamma^2} = m; \\ \frac{1 + 2r\gamma + \gamma^2}{2\gamma\sqrt{1 - r^2}} = \mu, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\gamma$  – отношение среднеквадратических отклонений (СКО) сигналов, излучаемых из точек модели;  $r$  – коэффициент взаимной корреляции сигналов, излучаемых из точек модели.

Воспользуемся соотношением для определения абсолютной нестабильности выходного параметра через нестабильность входных параметров [5]:

$$\Delta f(x_1 \dots x_n) = A_1 \Delta x_1 + \dots + A_n \Delta x_n,$$

где  $A_i = \frac{\partial f(x_1 \dots x_n)}{\partial x_i}$  – коэффициент нестабильности (чувствительности)  $i$ -го параметра;  $\Delta x_i$  – нестабильность (погрешность установки)  $i$ -го входного параметра.

С учетом этого соотношения для определения погрешности установки параметров распределения угловых шумов примут вид:

$$\Delta m = A_1 \Delta \gamma + A_2 \Delta r,$$

$$\Delta \mu = A_3 \Delta \gamma + A_4 \Delta r,$$

где  $\Delta \gamma$  – неточность установки отношения СКО излучаемых сигналов;  $\Delta r$  – неточность задания коэффициента взаимной корреляции излучаемых сигналов.

Рассмотрим выражения (1). При  $\gamma = 1$  математическое ожидание будет равно нулю при любом значении  $r$ . На интервале  $0 < \gamma < 1$  математическое ожидание ПРВ угловых шумов смещается к первому излучателю по мере удаления от точки  $\gamma = 0$ . На интервале  $1 < \gamma < \infty$  – ко второму по мере удаления от точки  $\gamma = 1$ . По своему физическому смыслу интервалы эквивалентны. Однако в силу разных протяженностей интервалов скорость изменения параметров ПРВ угловых шумов при изменении  $\gamma$  на них существенно различается. В силу этого будут различаться и коэффициенты нестабильности для этих двух интервалов, что существенно затруднит анализ. Для устранения указанной проблемы перейдем к логарифмической переменной  $t = 20 \lg(\gamma)$ , относительно которой скорость изменения параметров ПРВ будет одинакова для обоих интервалов. Тогда (1) можно переписать в виде:

$$\begin{cases} m = \frac{10^{\frac{2t}{20}} - 1}{1 + 2r10^{\frac{t}{20}} + 10^{\frac{2t}{20}}}; \\ \mu = \frac{1 + 2r10^{\frac{t}{20}} + 10^{\frac{2t}{20}}}{2 \cdot 10^{\frac{t}{20}} \sqrt{1 - r^2}}. \end{cases}$$

С учетом сделанной замены переменной выражения для определения погрешности установки параметров ПРВ угловых шумов примут вид

$$\Delta m = a_1 \Delta t + a_2 \Delta r,$$

$$\Delta \mu = a_3 \Delta t + a_4 \Delta r,$$

где

$$a_i = A_i \frac{1}{\gamma \ln(10)}; \Delta t = \frac{1}{\ln(10)} \frac{\Delta \gamma}{\gamma}.$$

Определим коэффициенты чувствительности:

$$a_1 = \frac{\partial m(t, r)}{\partial t} = \frac{10^{\frac{t}{20}} \ln 10 \left( 2 \cdot 10^{\frac{t}{20}} + r 10^{\frac{t}{10}} + r \right)}{10 \left( 1 + 2r 10^{\frac{t}{20}} + 10^{\frac{t}{10}} \right)^2};$$

$$a_2 = \frac{\partial m(t, r)}{\partial r} = - \frac{2 \cdot 10^{\frac{t}{20}} \left( 10^{\frac{t}{10}} - 1 \right)}{\left( 1 + 2r 10^{\frac{t}{20}} + 10^{\frac{t}{10}} \right)^2};$$

$$a_3 = \frac{\partial \mu(t, r)}{\partial t} = \frac{\ln(10) \left( 10^{\frac{t}{10}} - 1 \right)}{40 \cdot 10^{\frac{t}{20}} \sqrt{1 - r^2}};$$

$$a_4 = \frac{\partial \mu(t, r)}{\partial r} = \frac{2 \cdot 10^{\frac{t}{20}} + r + r 10^{\frac{t}{10}}}{2 \cdot 10^{\frac{t}{20}} (1 - r^2)^{3/2}}.$$

Полученные коэффициенты чувствительности определяют скорость изменения параметров ПРВ угловых шумов двухточечной модели при отклонении параметров сигналов от заданных значений.

Рассмотрим наихудший случай, когда коэффициенты чувствительности действуют в согласии, т.е. имеют один и тот же знак. Для этого случая можно записать соотношения, определяющие погрешность установки параметров ПРВ угловых шумов:

$$\begin{cases} \Delta m = |a_1| \Delta t + |a_2| \Delta r; \\ \Delta \mu = |a_3| \Delta t + |a_4| \Delta r; \\ \Delta t \geq 0; \\ \Delta r \geq 0. \end{cases} \quad (2)$$

Соотношения (2) позволяют определить максимальную ошибку моделирования параметров ПРВ угловых шумов, задавшись величиной погрешности установки параметров сигналов. С точки зрения практики интерес представляют обратные выражения, позволяющие, задавшись максимальной ошибкой моделирования, сформулировать требования к точности задания параметров сигналов. Такие выражения можно получить из (2):

$$\begin{cases} \Delta t = \frac{|a_4|}{|a_1| |a_4| - |a_3| |a_2|} \Delta m - \frac{|a_2|}{|a_1| |a_4| - |a_3| |a_2|} \Delta \mu; \\ \Delta r = \frac{-|a_3|}{|a_1| |a_4| - |a_3| |a_2|} \Delta m + \frac{|a_1|}{|a_1| |a_4| - |a_3| |a_2|} \Delta \mu; \\ \Delta t \geq 0; \\ \Delta r \geq 0. \end{cases} \quad (3)$$

Однако эти выражения не позволяют сформулировать требования к точности задания параметров сигналов. Проиллюстрируем это примером. Пусть требуемая максимальная ошибка представления параметров ПРВ угловых шумов составляет:  $\Delta m = 0,02$  и  $\Delta \mu = 0,02\mu$ . При размере базы двухточечной модели, равном 2, указанные величины ошибки представления параметров ПРВ угловых шумов соответствуют точности в 1% для параметра  $m$  и 2% для параметра  $\mu$ . При величинах  $t = -18,5$  дБ и  $r = 0,6$  допустимые ошибки задания параметров составляют  $\Delta t = 7,45$  дБ и  $\Delta r = -0,62$ . Отрицательное значение ошибки установки коэффициента взаимной корреляции означает недостижимость требуемой точности задания параметров. Вместе с тем в этой же точке допустимая ошибка установки разницы уровней сигналов велика. Логично предположить, что снижение допустимой ошибки установки разницы уровней может привести к значениям  $\Delta r \geq 0$ .

Оценить это можно следующим образом. Из первого и второго уравнений системы (2) выразим  $\Delta r_1$  и  $\Delta r_2$  (индекс означает номер исходного уравнения):

$$\begin{cases} \Delta r_1 = \frac{\Delta m - |a_1| \Delta t}{|a_2|}; \\ \Delta r_2 = \frac{\Delta \mu - |a_3| \Delta t}{|a_4|}. \end{cases}$$

Полученная система позволит сформулировать требования к точности задания коэффициента взаимной корреляции сигналов, зная точность установки уровней сигналов и требуемую точность моделирования параметров ПРВ угловых шумов. При  $\Delta r_1 = \Delta r_2$  после несложных преобразований получим

первое уравнение из системы (3). В общем случае  $\Delta r_1 \neq \Delta r_2$ . Это определяется разной чувствительностью параметров ПРВ угловых шумов к коэффициенту взаимной корреляции излучаемых сигналов. Требуемую точность задания коэффициента взаимной корреляции излучаемых сигналов можно определить по соотношению:

$$\Delta r = \min(\Delta r_1, \Delta r_2).$$

В этом случае при моделировании одного из параметров ПРВ угловых шумов будет обеспечиваться заданная ошибка, а для другого – не выше заданной величины.

Принимая ошибки представления параметров ПРВ угловых шумов, равные 5%, определим требования к точности установки коэффициента взаимной корреляции излучаемых сигналов для разных величин ошибки установки уровней. Результаты расчета приведены в виде линий уровня на рис. 1–3.

На рисунках изображена допустимая величина ошибки задания коэффициента взаимной корреляции, обеспечивающая ошибку моделирования ПРВ угловых шумов с параметрами, отличающимися от заданных не более чем на 5% для различных величин погрешности установки уровней сигнала.

Полученные зависимости, как и ожидалось, симметричны относительно значения  $t = 0$ . Наиболее высокие требования к точности задания коэффициента взаимной корреляции наблюдаются при  $|r| = 1$ .

На всех рисунках в пределах закрашенной области ошибки параметров ПРВ угловых шумов превышают заданные. Эта область образуется в окрестности точки  $(t; r) = (0; -1)$ . Ее размер ожидаемо быстро расширяется с ростом величины допустимой ошибки задания уровней сигналов  $\Delta t$ .

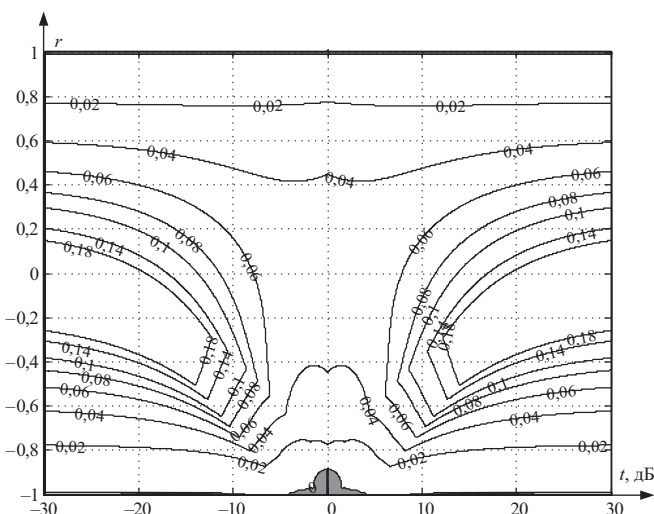


Рис. 1. Допустимая величина ошибки установки коэффициента взаимной корреляции при  $\Delta t = 0,1$  дБ

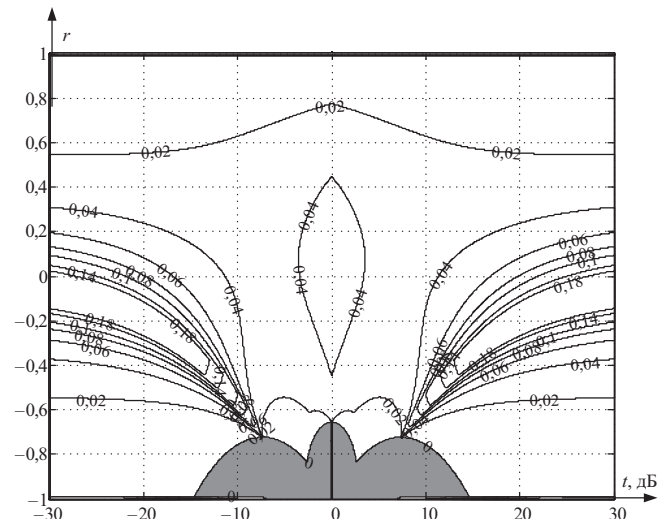


Рис. 2. Допустимая величина ошибки установки коэффициента взаимной корреляции при  $\Delta t = 0,3$  дБ

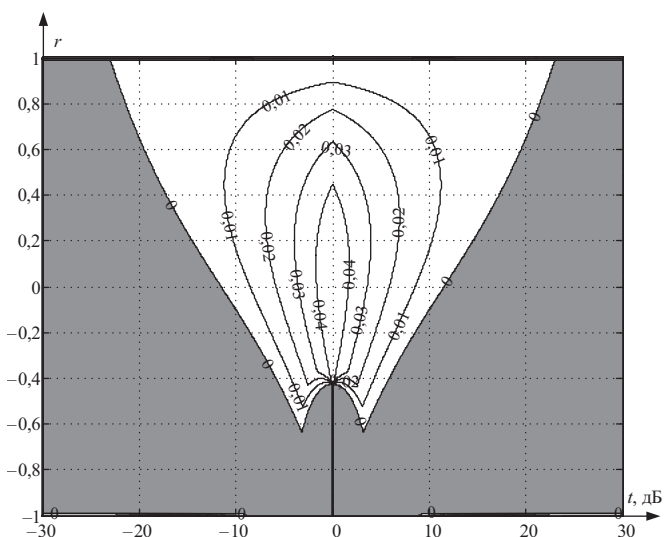


Рис. 3. Допустимая величина ошибки установки коэффициента взаимной корреляции при  $\Delta t = 0,5$  дБ

### Выводы

Получены аналитические соотношения, определяющие требования к точности задания коэффициента взаимной корреляции излучаемых сигналов при известной погрешности установки уровня

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов В. Н., Колтышев Е. Е., Кондратенков Г. С. Многофункциональные радиолокационные комплексы истребителей. М.: Радиотехника, 2014. 296 с.
2. Островитянов Р. В., Басалов Ф. А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. М.: Радио и связь, 1982. 232 с.
3. Монаков А. А., Островитянов Р. В. Оценка положения энергетического центра протяженного объекта по зависимой выборке // Радиотехника. 1998. Т. 1. С. 19–23.
4. Обобщенная модель матричного имитатора электромагнитных полей, отраженных от точечных и распределенных радиолокационных объектов / Н. В. Белявская, А. В. Киселев, М. А. Степанов, С. В. Тырыкин // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 4. С. 11–17.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. 4-е изд. М.: Наука, 1978. 832 с.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Сабитов Тимур Ильясевич**, магистрант, 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: sti0@mail.ru.

**Степанов Максим Андреевич**, 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: m.stepanov@corp.nstu.ru.

**Киселев Алексей Васильевич**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой 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.

излучаемого сигнала и заданной точности моделирования параметров угловых шумов.

Точность установки математического ожидания в основном определяется погрешностью задания уровней сигналов. Ошибки установки величины коэффициента взаимной корреляции излучаемых сигналов слабо влияют на математическое ожидание ПРВ угловых шумов.

Точность установки параметра  $\mu$  в основном определяется погрешностью задания коэффициента взаимной корреляции излучаемых сигналов. Ошибки установки уровней сигналов слабо влияют на параметр  $\mu$  ПРВ угловых шумов.

При постоянной величине ошибки моделирования ПРВ угловых шумов требования к точности задания параметров излучаемых сигналов зависят от  $m$  и  $\mu$ . Минимальные требования к точности задания параметров сигналов наблюдаются в области  $-0,3 < r < 0,7$  и  $-10 < t < 10$ . Соответствующие диапазоны изменения параметров ПРВ угловых шумов:  $-0,98 < m < 0,98$  и  $1,5 < \mu < 3,4$ .

К точности задания параметров излучаемых сигналов предъявляются высокие требования. Например, при ошибке моделирования параметров угловых шумов, не превышающей 5%, требуются точности задания амплитуд сигналов не хуже 0,5 дБ и коэффициента корреляции около 0,02–0,04.

For citation: Sabitov T.I., Stepanov M.A., Kiselev A.V. Requirements for accuracy of setting parameters of signals emitted by a matrix simulator. *Voprosy radioelektroniki*, 2019, no. 4, pp. 27–31. DOI 10.21778/2218-5453-2019-4-27-31

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

## REQUIREMENTS FOR ACCURACY OF SETTING PARAMETERS OF SIGNALS EMITTED BY A MATRIX SIMULATOR

Using the example of a two-point geometric model, to the points of which correlated normal random processes with specified spectral properties are summed, the influence of the inaccuracy of setting the parameters of signals emitted by a matrix simulator on the errors of angular noise modeling is considered. Simulation errors were estimated as deviations of the probability density parameters of the angular noise from the specified values. Relations have been obtained that allow to estimate the magnitude of modeling errors caused by the inaccurate setting of the parameters of the emitted signals. It is established that errors in setting signal levels primarily lead to a deviation of the expectation of angular noise from a given value. Not accurate specification of the cross-correlation coefficient of the emitted signals leads to a change in the parameter of the width of the probability density distribution of the angular noise, that is, leads to errors in specifying the angular size of the object being replaced. The ranges of the angular position and angular dimensions of the replaced objects are determined, within which the requirements on the accuracy of setting the parameters of the signals emitted by the matrix simulator are minimal.

**Keywords:** angular noise, modeling accuracy, geometric model

## REFERENCES

1. Antipov V.N., Koltyshev Ye. Ye., Kondratenkov G.S. *Mnogofunktsionalnye radiolokatsionnye komplekсы istrebitelei* [Multifunctional radar systems for fighters]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014, 296 p. (In Russian).
2. Ostrovityanov R.V., Basalov F.A. *Statisticheskaya teoriya radiolokatsii protyazhennykh tseley* [The statistical theory of radar extended targets]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1982, 232 p. (In Russian).
3. Monakov A.A., Ostrovityanov R.V. Assessment of the position of the energy center of an extended object by the dependent sample. *Radiotekhnika*, 1998, vol. 1, pp. 19–23. (In Russian).
4. Belyavskaya N.V., Kiselev A.V., Stepanov M.A., Tyrykin S.V. Generalized mathematical model of matrix simulator of electromagnetic fields reflected from the point and distributed radar objects. *Voprosy radioelektroniki*, 2016, no. 4, pp. 11–17. (In Russian).
5. Korn G., Korn T. *Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review*. McGraw-Hill, 1968, 1130 p.

## AUTHORS

**Sabitov Timur**, undergraduate student, 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: sti0@mail.ru.

**Stepanov Maksim**, 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: m.stepanov@corp.nstu.ru.

**Kiselev Aleksey**, D. Sc., professor, head of the 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.