

УДК 621.396.96

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ УСТАНОВКИ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ В МАТРИЧНЫХ ИМИТАТОРАХ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОБСТАНОВКИ**А.В. Киселев, А.В. Таюров***Новосибирский государственный технический университет*

Рассмотрены оценки погрешности установки углового положения кажущегося центра излучения матричным имитатором, являющиеся, по сути, его систематической ошибкой. Показано, что причиной возникновения ошибки является замещение моделируемого точечного излучателя несколькими точками. Получены аналитические соотношения, позволяющие по характеристикам матричного имитатора и диаграммы направленности приемной антенны, работающей с матричным имитатором радиотехнической системы, рассчитать величину систематической ошибки пеленгации. Показано, что рассматриваемая ошибка полностью определяется нелинейностью пеленгационной характеристики антенны. Установлено, что ошибка наиболее существенна при имитации кажущегося центра излучения за пределами матрицы. Для области внутри матрицы получены зависимости максимальных значений ошибок и их угловых положений от формы диаграммы направленности антенны и задаваемого положения точки излучения. Получены соотношения, позволяющие оценивать ошибки в зависимости от соотношения угловых размеров матрицы, ширины диаграммы направленности антенны и коэффициентов аппроксимации ее диаграммы направленности. Достоверность полученных результатов подтверждена путем сравнения с результатами, полученными путем численного моделирования. Результаты работы могут быть использованы для решения прикладных задач, связанных с разработкой матричных имитаторов и имитационных комплексов на их основе, а также для прогнозирования их точностных характеристик.

Ключевые слова: матричный имитатор, систематическая ошибка, установка углового положения, кажущийся центр излучения, имитационное моделирование, двухточечная модель, радиопеленгация.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-34-44

Введение

Ключевым вопросом при имитационном моделировании радиоэлектронной обстановки является достоверность воспроизведения реальной ситуации. В свою очередь она во многом определяется точностью установки параметров сигналов и помех, создаваемых имитатором. В частности, при имитации объектов, перемещающихся по угловым координатам, точностью установки их текущего углового положения. Это в полной мере относится и к так называемым матричным имитаторам (МИ) [1] – [3], преобразующим моделируемые сигналы и помехи в электромагнитные поля, имеющие заданное направление прихода к антенне испытываемой радиоэлектронной системы.

На рис. 1 схематично показан простейший МИ, состоящий из двух излучателей, где $2L$ – линейное расстояние между излучателями МИ (база МИ); R – расстояние от МИ до фазового центра антенны исследуемой системы; α_0 , δ – угловое положение оси ДНА и излучателя МИ соответственно; $X_{\text{КЦИ}}$ – линейное положение КЦИ; $2\alpha_{0.5}$ – ширина диаграммы направленности (ДНА) антенны системы по уровню половинной мощности.

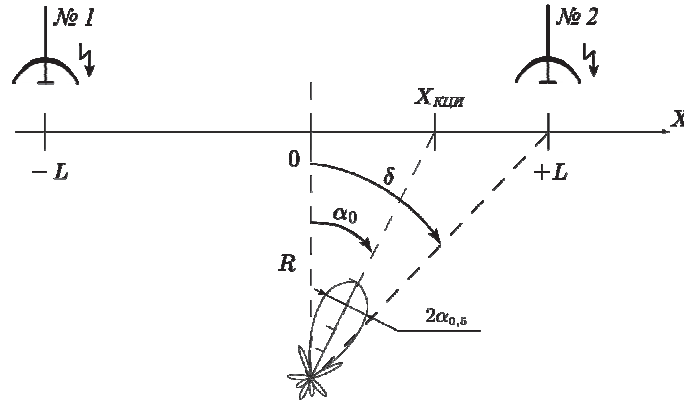


Рис. 1 – Матричный имитатор точечных объектов

Fig. 1 – Matrix simulator of point objects

Излучатели МИ ДНА не разрешаются и воспринимаются как одна излучающая точка, называемая кажущимся центром излучения (далее КЦИ). Его угловое положение (ξ) определяется амплитудами и разностью фаз сигналов, подводимых к излучателям МИ [4].

Согласно [4] относительное (безразмерное, нормированное к половине базы МИ) положение КЦИ определяется выражением

$$\xi = \frac{\operatorname{tg}(\alpha_0)}{\delta} \approx \frac{1 - z_0^2}{1 + 2z_0 \cos \psi + z_0^2}, \quad (1)$$

где $z_0 = A_1 / A_2$; ψ – отношение нормированных амплитуд и разность начальных фаз сигналов, подводимых к излучателям, пересчитанные в точку расположения фазового центра приемной антенны.

Для установки заданного положения A_1 и A_2 должны удовлетворять условию (для $A_1 + A_2 = 1$ и синфазных сигналов ($\psi = 0$), при которых имеют место наименьшие искажения диаграммы направленности антенны [5]):

$$A_1 = \frac{1 - \xi}{2}, \quad A_2 = \frac{1 + \xi}{2}.$$

Тогда подводимый к МИ сигнал распределяется между излучателями в соответствии с весами:

$$\dot{S}_1 = A_1, \quad \dot{S}_2 = A_2 e^{-j\psi}.$$

1. Постановка задачи

По сути, при использовании МИ точечный объект замещается системой, состоящей как минимум из двух излучателей, разнесенных по угловой координате. То есть одна точка излучения заменяется двумя. Логично ожидать, что такая замена вызовет специфические различия между реальной и имитируемой ситуацией – приведет к ошибкам имитации. Обычно [5] их сводят к эквивалентным искажениям диаграммы направленности антенны испытываемой системы. Они проявляются

в виде ее эквивалентного расширения, изменения уровня боковых лепестков, «размывания» нулей. Вместе с тем, с точки зрения имитации радиоэлектронной обстановки системам оценки угловых координат, первостепенное значение имеют не искажения ДНА, а точность установки положения КЦИ. К сожалению, в литературе [5, 6] вопрос, связанный с этими ошибками, освещен весьма поверхностно, сводится к некоторым общим положениям и соотношениям, малоприменимым для практического использования. Исключения составляют случайные ошибки, обусловленные неидеальностью фазировки излучателей МИ. Они достаточно полно рассмотрены в литературе [7, 8].

Цель настоящей работы – определить ошибки установки положения КЦИ, обусловленные заменой точечного излучателя системой из двух точек, и их связь с параметрами МИ и ДНА.

2. Решение

Рассмотрим простейший амплитудный метод пеленгации, суть которого заключается в определении угловой координаты КЦИ путем поворота направленной антенны в плоскости расположения излучателей МИ и фиксации ее углового положения, соответствующего максимальному уровню принимаемого сигнала [9].

Абсолютная ошибка определения положения КЦИ равна разности между измеренным $\xi_{\text{изм}}$ и устанавливаемым (требуемым) $\xi_{\text{треб}}$ положением КЦИ:

$$\chi(\xi) = \xi_{\text{изм}} - \xi_{\text{треб}} = \frac{\alpha_{\text{изм}}}{\delta} - \xi_{\text{треб}}. \quad (2)$$

В идеальном случае измеренное таким образом значение угла ($\xi_{\text{изм}}$) должно равняться требуемому ($\xi_{\text{треб}}$), т. е. ошибка установки углового положения должна отсутствовать:

$$\chi(\xi) = \xi_{\text{изм}} - \xi_{\text{треб}} = 0.$$

Рассмотрим, что будет иметь место при использовании МИ, схематично представленного на рис 1.

Амплитуда сигнала на выходе приемной антенны:

$$U_{\Sigma}(\alpha_0, \xi, \delta) \propto F(\alpha_0 - \delta)\dot{S}_1(\xi) + F(\alpha_0 + \delta)\dot{S}_2(\xi), \quad (3)$$

где \propto – знак пропорциональности; $F(\alpha)$ – ДН антенны радиоэлектронной системы.

Для получения общих соотношений, инвариантных к форме ДНА, аппроксимируем $F(\alpha)$ степенным полиномом:

$$F_2(\alpha) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{F^{(n)}(\alpha_a)}{n!} (\alpha - \alpha_a)^n.$$

При ограничении первыми четырьмя членами ряда аппроксимирующий полином имеет вид

$$F_2(\alpha) = a_0 + a_1(\alpha - \alpha_a) + a_2(\alpha - \alpha_a)^2 + a_3(\alpha - \alpha_a)^3 + a_4(\alpha - \alpha_a)^4,$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= F(\alpha_a); \quad a_1 = \left. \frac{dF(\alpha)}{d\alpha} \right|_{\alpha=\alpha_a}; \quad a_2 = \left. \frac{1}{2} \frac{dF^2(\alpha)}{d\alpha^2} \right|_{\alpha=\alpha_a}; \\ a_3 &= \left. \frac{1}{6} \frac{dF^3(\alpha)}{d\alpha^3} \right|_{\alpha=\alpha_a}; \quad a_4 = \left. \frac{1}{24} \frac{dF^4(\alpha)}{d\alpha^4} \right|_{\alpha=\alpha_a}; \end{aligned}$$

$\alpha_a = 0$ – точка, в окрестности которой производится аппроксимация ДНА.

Рассмотрим симметричные ДНА, описываемые четными функциями. Тогда $a_1 = a_3 = 0$ и аппроксимирующий полином принимает вид

$$F_2(\alpha) = a_0 + a_2(\alpha - \alpha_a)^2 + a_4(\alpha - \alpha_a)^4. \quad (4)$$

При этом

$$\begin{aligned} U_{\Sigma}(\alpha_0, \xi, \delta) &\sqcup \left| \left(a_0 + a_2(\alpha_0 - \delta)^2 + a_4(\alpha_0 - \delta)^4 \right) \dot{S}_1(\xi) + \right. \\ &\quad \left. + \left(a_0 + a_2(\alpha_0 + \delta)^2 + a_4(\alpha_0 + \delta)^4 \right) \dot{S}_2(\xi) \right|. \end{aligned} \quad (5)$$

Исследуем полученное выражение на наличие экстремумов, точнее, максимума в точке $\alpha_0 = \alpha_{0\max}$:

$$\left. \frac{d}{d\alpha_0} U_{\Sigma}(\alpha_0, \xi, \delta) \right|_{\alpha_0 = \alpha_{0\max}} = 0. \quad (6)$$

После взятия производной получим уравнение

$$\begin{aligned} &\alpha_{0\max}^3(-2a_4) + \alpha_{0\max}^2(6a_4\xi\delta) + \\ &+ \alpha_{0\max}(-6a_4\delta^2 - a_2) + (2a_4\xi\delta^3 + a_2\xi\delta) = 0. \end{aligned}$$

Решим его относительно $\alpha_{0\max}$ при помощи формулы Кардано [10].

Для этого введем замену переменных:

$$a\alpha_{0\max}^3 + b\alpha_{0\max}^2 + c\alpha_{0\max} + d = 0,$$

где $a = -2a_4$; $b = 6a_4\xi\delta$; $c = -6a_4\delta^2 - a_2$; $d = 2a_4\xi\delta^3 + a_2\xi\delta$.

Введем дополнительные переменные:

$$p = \frac{3 \cdot a \cdot c - b^2}{3 \cdot a^2}, \quad q = \frac{2 \cdot b^3 - 9 \cdot a \cdot b \cdot c + 27 \cdot a^2 \cdot d}{27 \cdot a^3}, \quad c_{1,2} = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} \pm \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}}.$$

Решаемое уравнение имеет три корня:

$$\alpha_{0\max 1} = c_1 + c_2 - \frac{b}{3 \cdot a}, \quad \alpha_{0\max 2,3} = -\frac{c_1 + c_2}{2} - \frac{b}{3a} \pm \frac{c_1 - c_2}{2} \sqrt{3} \cdot j,$$

где j – мнимая единица.

При этом функция (5) имеет два минимума и один максимум (рис. 2, на рисунке экстремумы отмечены кружками).

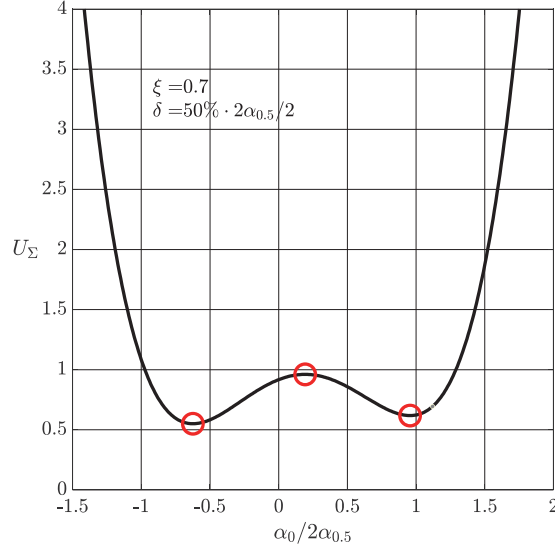


Рис. 2 – Зависимость нормированной амплитуды сигнала на выходе приемной антенны от угла поворота антенны

Fig. 2 – Dependence of the normalized signal amplitude at the output of the receiving antenna on the angle of rotation of the antenna

Максимум достигается при

$$\alpha_0 = \alpha_{0 \max} = -\frac{c_1 + c_2}{2} - \frac{b}{3a} - \frac{c_1 - c_2}{2} \sqrt{3} \cdot j.$$

Выполнив обратную замену переменных, получим итоговое соотношение для нахождения углового положения КЦИ:

$$\alpha_{\text{изм}}(\xi, \delta) = \delta \xi + \frac{1}{2} \left(-T(\xi, \delta) + \frac{\delta^2 - \delta^2 \xi^2 + \frac{a_2}{6a_4}}{T(\xi, \delta)} \right) - \frac{j\sqrt{3}}{2} \left(T(\xi, \delta) + \frac{\delta^2 - \delta^2 \xi^2 + \frac{a_2}{6a_4}}{T(\xi, \delta)} \right), \quad (7)$$

где

$$T(\xi, \delta) = \sqrt[3]{\left(\delta^2 - \delta^2 \xi^2 + \frac{a_2}{6a_4} \right)^3 + \delta^6 \xi^2 (\xi^2 - 1)^2 + \delta^3 (\xi^3 - \xi)}.$$

Первое слагаемое подкоренного выражения отрицательно:

$$\left(\delta^2 - \delta^2 \xi^2 + \frac{a_2}{6a_4} \right) < 0,$$

что приводит к комплексным результатам при вычислении $T(\xi, \delta)$. Поэтому в (7) слагаемые, кроме первого, являются комплексно-сопряженными парами, сложение которых обращает в нуль мнимую часть. В результате исходное выражение может быть переписано:

$$\alpha_{\text{изм}}(\xi, \delta) = \delta \xi - \operatorname{Re} \left[\sqrt[3]{\sqrt{\left(\delta^2 - \delta^2 \xi^2 + \frac{a_2}{6a_4} \right)^3 + \delta^6 \xi^2 (\xi^2 - 1)^2 + \delta^3 (\xi^3 - \xi) \cdot (1 + j\sqrt{3})}} \right]. \quad (8)$$

Подставив (8) в (2) и упростив полученное выражение, получим

$$\chi_2(\xi) = -\operatorname{Re} \left[\sqrt[3]{\sqrt{P^3 - 3\xi^2 P^2 + 3\xi^4 P + \xi^4} + (\xi^3 - \xi) \cdot (1 + j\sqrt{3})} \right], \quad (9)$$

где

$$P = \frac{1}{\delta^2} \frac{a_2}{6a_4}.$$

Для сокращения записи в (9) принято обозначение $\xi_{\text{треб}} = \xi$.

Ошибка установки зависит от требуемого положения КЦИ ($\xi_{\text{треб}} = \xi$), разности излучателей МИ (δ) и формы ДН (коэффициентов аппроксимации a_2 и a_4).

Ключевым моментом является зависимость ошибки от параметра P , определяемого относительным вкладом в ДНА четвертой степени углового отклонения от оси антенны. При этом, если $a_4 = 0$, то P стремится к минус бесконечности и ошибка установки углового положения стремится к нулю. Из этого следует, что причиной возникновения ошибки является нелинейность пеленгационной характеристики антенны.

3. Результаты моделирования и расчетов

Проанализируем полученные результаты.

На рис. 3 представлены результаты расчетов по полученной формуле (χ_2), а также значения ошибки, найденные численными методами непосредственно для исходной ДНА (χ_0) и аппроксимированной ДНА (χ_1). В последних двух случаях угловое положение КЦИ определялось методом золотого сечения, с помощью которого находилось значение угла, при котором максимален уровень сигнала на выходе антенны. Нетрудно заметить хорошее соответствие между оценками ошибок.

Кроме того, видно, что ошибка имеет место при установке положения КЦИ как в пределах базы МИ, так и за ее пределами. Причем в последнем случае ошибка быстро нарастает с увеличением отклонения положения КЦИ от центра матрицы.

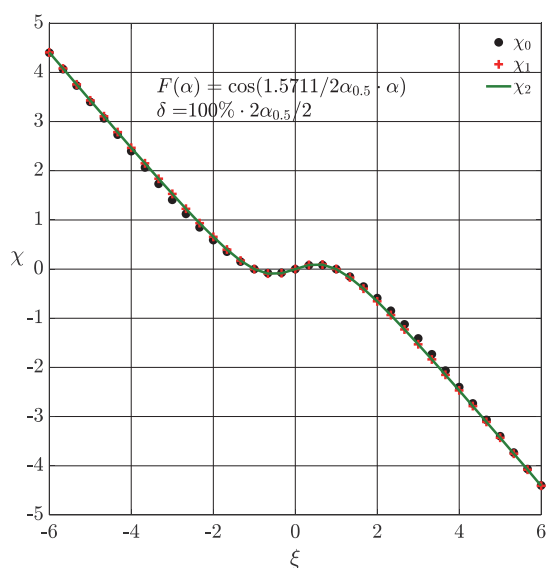


Рис. 3 – Зависимость систематической ошибки установки углового положения КЦИ от требуемого положения КЦИ

Fig. 3 – The dependence of the systematic error of the installation of the angular position of the apparent radiation center (ARC) on the required position of the ARC

Как правило [11], диапазон устанавливаемых положений КЦИ ограничивают пределами МИ. Поэтому безусловный интерес представляют максимальные значения, которых достигает ошибка, и положения КЦИ, при которых эти ошибки достигаются (рис. 4).

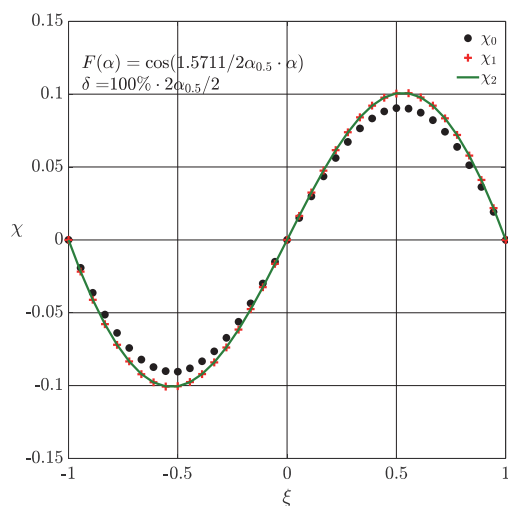


Рис. 4 – Зависимость ошибки пеленга от углового положения КЦИ в пределах матрицы

Fig. 4 – The dependence of the bearing error on the angular position of ARC within the matrix

Оценим эти величины.

Согласно полученным соотношениям, ошибка пеленга и ее угловое положение зависят от формы ДНА. Так как функция ошибки обладает симметрией, рассмотрим область нормированных положений КЦИ: $0 \leq \xi \leq 1$, т. е. половину базы матрицы. Значения параметра P возьмем равным $-4,8615/6\delta^2$ и $-1,4413/6\delta^2$, что соответствует ДНА вида косинус

$$F(\alpha) = \cos(1,5711/2\alpha_{0,5}\alpha)$$

и гауссовой кривой

$$F(\alpha) = \exp(-(1,178/2\alpha_{0,5}\alpha)^2)$$

соответственно.

Аргументы функций выбраны таким образом, чтобы обеспечить равенство ширины ДНА. Выбранные значения соответствуют крайним случаям из широко используемых аппроксимаций ДНА (для первой значение P максимально, для второй минимально).

Результаты численных расчетов максимального значения ошибок, имеющих место при задании положения КЦИ в пределах МИ, и их положения приведены на рис. 5. На эти же графики (знаками «*» и «•») нанесены значения максимального уровня ошибки и угловые положения максимальной ошибки соответственно, полученные без применения аппроксимации и (9).

Из рисунков следует, что применение аппроксимации ДН полиномом четвертой степени приводит к завышенным показателям максимальной ошибки пеленга. Это гарантирует, что значения максимальной ошибки пеленга всегда будут не больше вычисленных по полученным соотношениям (рис. 4).

4. Заключение

1. Замещение точечного объекта системой из нескольких излучателей, имеющее место в матричных имитаторах, приводит к появлению специфических ошибок установки углового положения кажущегося центра излучения. Эти ошибки могут рассматриваться как систематические ошибки установки углового положения.

2. Ошибки имеют место во всей области возможных угловых положений КЦИ как в пределах матрицы, так и за ее пределами. Причем в последнем случае они быстро нарастают с ростом отклонения положения КЦИ от краев МИ. Ошибки имеют нулевые значения только для трех положений КЦИ. В центре матрицы и на ее краях (в точках, совпадающих с положениями излучателей).

3. Величина ошибки зависит от разнота излучателей МИ, углового положения КЦИ и формы ДНА испытываемой радиоэлектронной системы. Точнее, от нелинейности пеленгационной характеристики антенны, определяемой отношением коэффициентов a_4 и a_2 , полинома, аппроксимирующего ДНА.

4. В целом в данной работе рассмотрены оценки систематической ошибки установки углового положения КЦИ, возникающей в матричном имитаторе из-за замещения излучающей точки несколькими (двумя) неразрешаемыми излучателями.

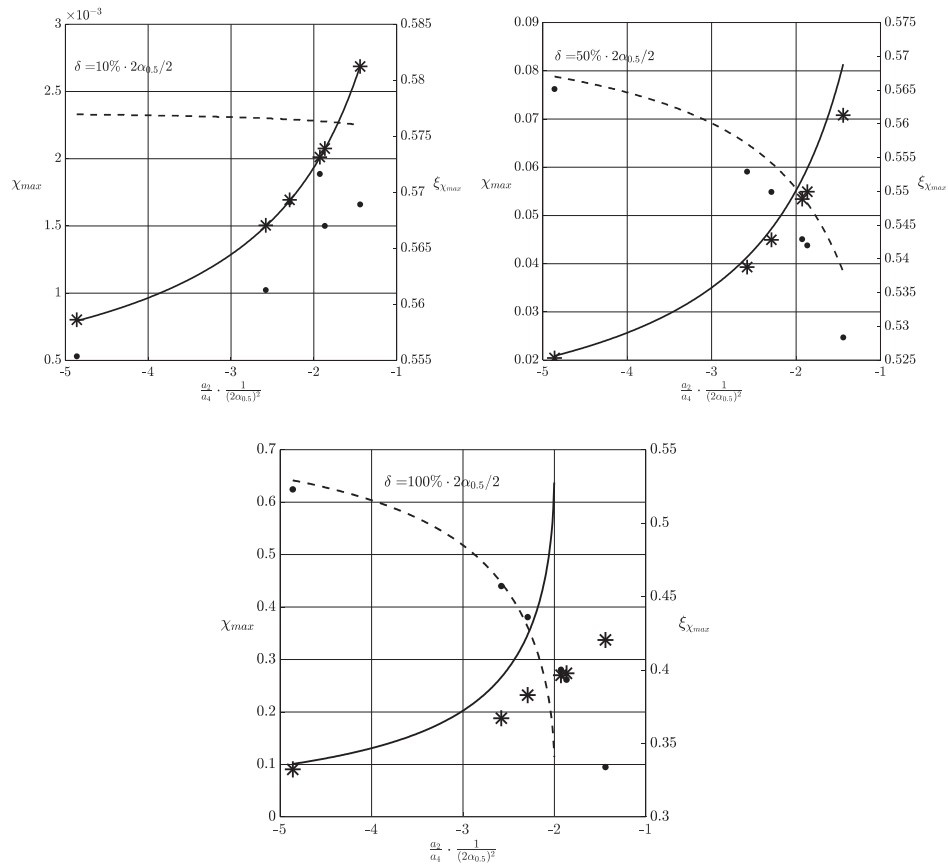


Рис. 5 – Зависимость: максимального уровня ошибки пеленга (сплошная линия); нормированного углового положения максимума ошибки пеленга в пределах матрицы от коэффициентов аппроксимации ДНА (штриховая линия) для трех значений базы матрицы

Fig. 5 – The dependence of: the maximum level of the bearing error (solid line), the normalized angular position of the maximum of the bearing error within the matrix on the approximation coefficients of the antenna radiation pattern (ARP) (dashed line) for the three values of the matrix base

ЛИТЕРАТУРА

1. Patent № 4660041 US. Radar scene simulator: publ. date 21.04.1987 / Maples V.H., Eastman G.A.
2. Patent № 3114910 US. Moving target simulators: publ. date 17.12.1963 / Rymes W.H.
3. Патент № 2094915 Российская Федерация. Имитатор источников радиосигналов: опубл. 27.10.1994 / Еремин Е.И., Половинкин Л.П., Торгованов В.А.
4. **Островитянов Р.В., Басалов Ф.А.** Статистическая теория радиолокации протяженных целей. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.
5. **Тырыкин С.В., Сабитов Т.И., Киселев А.В.** Специальные вопросы построения когерентных матричных имитаторов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021. – 232 с.
6. Работа радиолокационной угломерной системы в условиях сигнала, создаваемого когерентными источниками излучения из двух точек пространства / А.А. Дятко, С.М. Костромицкий, П.Н. Шумский, И.Н. Давыденко // Доклады БГУИР. – 2019. – № 7–8 (126). – С. 22–29. – DOI: 10.35596/1729-7648-2019-126-8-22-29.
7. **Никулин А.В.** Имитация отражений радиосигналов на основе использования дискретных излучателей статистически независимых сигналов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04. – Новосибирск, 2015. – 22 с.

8. Степанов М.А., Сабитов Т.И., Киселев А.В. Ошибки фазировки матричного имитатора эхосигналов многоантенной радиоэлектронной системы // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 10. – С. 1–15. – DOI: 10.30898/1684-1719.2021.10.14.
9. Кацнельсон В.З., Тимченко Н.И., Волков В.В. Основы радиолокации и импульсной техники. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 334 с.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1973. – 832 с.
11. Патент № 2287168 Российская Федерация. Способ защиты радиолокационной станции от противорадиолокационной ракеты на основе использования дополнительного источника излучения подъемного типа: опубл. 06.04.2005 / Успенский С.А.

SYSTEMATIC ERRORS IN SETTING THE ANGULAR POSITION IN MATRIX SIMULATORS OF THE RADIO-ELECTRONIC ENVIRONMENT

Kiselev A.V., Tayurov A.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Estimates of the error in setting the angular position of the apparent center of radiation by a matrix simulator, which are, in fact, its systematic error, are considered. It is shown that the cause of the error is the replacement of the simulated point emitter by several points. Analytical relations have been obtained that allow calculating the magnitude of the systematic direction finding error based on the characteristics of the matrix simulator and the radiation pattern of the receiving antenna operating with the matrix simulator of the radio engineering system. It is shown that the considered error is completely determined by the nonlinearity of the direction finding characteristic of the antenna. It is established that the error is most significant when simulating the apparent center of radiation outside the matrix. For the area inside the matrix, the dependences of the maximum error values and their angular positions on the shape of the antenna pattern and the specified position of the radiation point are obtained. The relations allowing to estimate errors depending on the ratio of the angular dimensions of the matrix, the width of the antenna radiation pattern and the coefficients of approximation of its radiation pattern are obtained. The reliability of the obtained results is confirmed by comparison with the results obtained by numerical simulation. The results of the work can be used to solve applied problems related to the development of matrix simulators and simulation complexes based on them, as well as to predict their accuracy characteristics.

Keywords: matrix simulator, systematic error, angular position setting, apparent radiation center, simulation modeling, two-point model, radio direction finding.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-34-44

REFERENCES

1. Maples V.H., Eastman G.A. *Radar scene simulator*. Patent US, no. 4660041, 1987.
2. Rymes W.H. *Moving target simulators*. Patent US, no. 3114910, 1963.
3. Eremin E.I., Polovinkin L.P., Torgovanov V.A. *Imitator istochnikov radiosignalov* [Simulator of radio signal sources]. Patent RF, no. 2094915, 1994.
4. 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.
5. Tyrykin S.V., Sabitov T.I., Kiselev A.V. *Spetsial'nye voprosy postroeniya kogerentnykh matrichnykh imitatorov* [Special issues of constructing coherent matrix simulators]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2021. 232 p.
6. Dyatko A.A., Kostromitski S.M., Shumski P.N., Davydenko I.N. *Rabota radiolokatsionnoi uglomernoi sistemy v usloviyakh signala, sozdavaemogo ko-gerentnymi istochnikami izlucheniya iz dvukh toчек prostranstva* [Operation of the radiolocation angular system in the conditions of the signal created by coherent sources of radiation from two spots]. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki*, 2019, no. 7–8 (126), pp. 22–29. DOI: 10.35596/1729-7648-2019-126-8-22-29.

7. Nikulin A.V. *Imitatsiya otrazhenii radiosignalov na osnove ispol'zovaniya diskretnykh izluchatelei statisticheski nezavisimyykh signalov*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Simulation of radio signal reflections based on the use of discrete emitters of statistically independent signals. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, NSTU, Publ., 2015, 23 p.
8. Stepanov M.A., Sabitov T.I., Kiselev A.V. Oshibki fazirovki matrichnogo imitatora ekhsignalov mnogoantennnoi radioelektronnoi sistemy [Phasing errors of the matrix simulator of the echo signals of the multi-antenna radar system]. *Zhurnal Radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*, 2021, no. 10, pp. 1–15. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.10.14.
9. Katsnel'son V.Z., Timchenko N.I., Volkov V.V. *Osnovy radiolokatsii i impul'snoi tekhniki* [Fundamentals of radar and pulse technology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 334 p.
10. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical handbook: for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 832 p. (In Russian).
11. Uspenskii S.A. *Sposob zashchity radiolokatsionnoi stantsii ot protivoradiolokatsionnoi rakety na osnove ispol'zovaniya dopolnitel'nogo istochnika izlucheniya pod"emnogo tipa* [A method for protecting a radar station from an anti-radar missile based on the use of an additional lifting-type radiation source]. Patent RF, no. 2287168, 2005.

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 160 публикаций. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: nil_rtu@ngs.ru).

Kiselev Alexey Vasilevich (b. 1958) – Doctor of Sciences (Eng.), a 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 author more 150 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: nil_rtu@ngs.ru).



Таяуров Антон Викторович – родился в 1997 году, аспирант кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: математическое моделирование радиолокационных отражений, радиолокация, радиосвязь. Опубликовано 7 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: ya.antoha.rt@gmail.com).

Tayurov Anton Viktorovich (b. 1997) – Postgraduate student at the Department of Radio receivers and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on mathematical modeling of radar reflections, radar, radio communication. He is author 7 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: nil_rtu@ngs.ru).

Статья поступила 06 октября 2023 г.
Received October 06, 2023

To Reference:

Kiselev A.V., Tayurov A.V. Sistemicheskie oshibki ustanovki uglovogo polozheniya v matrichnykh imitatorakh radioelektronnoi obstanovki [Systematic errors in setting the angular position in matrix simulators of the radio-electronic environment]. *Doklady Akademii nauk vyssheish shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 4 (61), pp. 34–44. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-34-44.