

УДК 621.396.96

СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОШИБОК УСТАНОВКИ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ В МАТРИЧНЫХ ИМИТАТОРАХ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОБСТАНОВКИ

А.В. Киселев, А.В. Таюров

Новосибирский государственный технический университет

Получены упрощенные формулы для оценки погрешности установки углового положения кажущегося центра излучения в матричном имитаторе. Для этого использована аппроксимация функции ошибки. Показано, что известная формула для расчета ошибки при имитации радиолокационных отражений от точечных целей, при использовании для нахождения статистических характеристик шумов координат распределенных целей, требует упрощений. В этом случае функция ошибки может быть разделена на четыре участка, в пределах которых допускается ее аппроксимация полиномами первой или второй степени. При этом функция ошибки обладает косой симметрией, что позволяет анализировать лишь два участка, а результаты распространить на четыре. В качестве способа поиска оптимального разбиения на участки применен метод численного перебора. Для типовых форм главного лепестка диаграммы направленности антенны радиолокационной станции получены коэффициенты аппроксимирующих полиномов методом симплекса Нелдера–Мида. Показано, что использование аппроксимации позволяет получить аналитические выражения для моментов ошибки установки углового положения кажущегося центра излучения. В частности приведены соотношения для нахождения математического ожидания ошибки.

Ключевые слова: матричный имитатор, ошибка установки углового положения, кажущийся центр излучения, имитационное моделирование, шумы координат.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-43-53

Введение

Большое число объектов радиолокационных измерений не может рассматриваться как точечные цели [1]. Их распределенность приводит к специфическим явлениям, в частности их угловое положение, оцененное методами радиолокации, становится случайным [2]. Результат его измерения представляет собой случайный процесс, называемый шумами угловых координат (далее сокращенно ШК – шумы координат) [3]. При имитационном моделировании эти шумы должны воспроизводиться с заданной точностью [4].

Наиболее современным средством их моделирования являются так называемые матричные имитаторы (сокращенно МИ) [5, 6]. К сожалению, их работа, точнее установка углового положения объектов, сопряжена с ошибками, механизм возникновения которых и их связь с параметрами МИ, диаграммой направленности антенны РЛС (сокращенно ДНА РЛС), рассмотрены в [7, 8]. При этом полученное в [9] соотношение для величины ошибок достаточно сложно:

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

где $P = \frac{1}{\delta^2} \frac{r_2}{6r_4}$; r_2, r_4 – коэффициенты полинома, аппроксимирующего одномерную диаграмму направленности антенны РЛС:

$$F(\alpha) = r_0 + r_1(\alpha - \alpha_a) + r_2(\alpha - \alpha_a)^2 + r_3(\alpha - \alpha_a)^3 + r_4(\alpha - \alpha_a)^4;$$

$$r_0 = F(\alpha_a); \quad r_1 = \left. \frac{dF(\alpha)}{d\alpha} \right|_{\alpha=\alpha_a}; \quad r_2 = \frac{1}{2} \left. \frac{d^2 F(\alpha)}{d\alpha^2} \right|_{\alpha=\alpha_a};$$

$$r_3 = \frac{1}{6} \left. \frac{d^3 F(\alpha)}{d\alpha^3} \right|_{\alpha=\alpha_a}; \quad r_4 = \frac{1}{24} \left. \frac{d^4 F(\alpha)}{d\alpha^4} \right|_{\alpha=\alpha_a};$$

$\alpha_a = 0$ – точка, в окрестности которой производится аппроксимация ДНА; δ – угол, образованный центром МИ и излучателем МИ, далее – разнос излучателей МИ; $\xi_{\text{изм}}$, ξ – измеренное и требуемое положение кажущегося центра излучения (КЦИ); j – мнимая единица.

Это затрудняет его использование для оценки статистических характеристик имитируемых сигналов, в частности при проверках их адекватности.

1. Постановка задачи

Действительно, даже при вычислении первого момента ошибки имеем

$$M_1(m, v) = \int_{\xi=-\xi_{\max}}^{\xi_{\max}} \chi(\xi) W(\xi, m, v) d\xi, \quad (2)$$

где плотность вероятности распределения ШК [3]

$$W(\xi, m, v) = \frac{v}{2(1 + v^2(\xi - m)^2)^{3/2}};$$

m – математическое ожидание; v – параметр, обратно пропорциональный ширине функции распределения; $\xi_{\max}$ – максимально возможное удаление КЦИ, имеем:

$$M_1(m, v) = \int_{\xi=-\xi_{\max}}^{\xi_{\max}} \left(-\operatorname{Re} \left[\sqrt[3]{\sqrt{P^3 + (1 - \xi^2)3P^2 + (1 - 2\xi^2 + \xi^4)3P + (\xi^3 - \xi) \times}} \right. \right. \\ \left. \left. \times (1 + j\sqrt{3}) \right] W(\xi, m, v) \right) d\xi.$$

Поэтому актуальна задача упрощения соотношения (1).

Цель работы – получить упрощенные выражения для расчета ошибок установки углового положения кажущегося центра излучения в матричном имитаторе.

2. Решение

На рис. 1 представлен типичный пример расчета функции ошибки, вычисленной по (1) для соотношения разноса излучателя и ширины ДНА $\delta = 0,5\alpha_{0,5}$, где $\alpha_{0,5}$ – полуширина ДНА по уровню половинной мощности. Видно, что она:

- кососимметрична;
- в пределах матрицы ($-1 \leq \xi \leq 1$) существенно нелинейна;
- при значительных выходах за ее пределы близка к линейной.

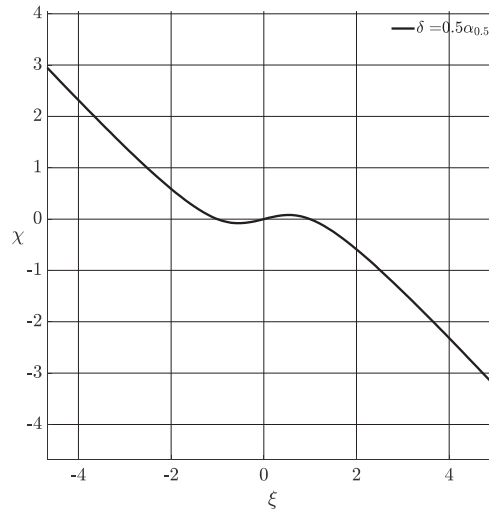


Рис. 1 – Пример зависимости ошибки пеленга от заданного положения КЦИ для $F(\alpha) = \cos(1,5711\alpha / 2\alpha_{0,5})$

Fig. 1 – An example of the dependence of the bearing error on a given position of the apparent radiation center (ARC) for $F(\alpha) = \cos(1,5711\alpha / 2\alpha_{0,5})$

Тогда в качестве аппроксимирующей ее функции логично рассмотреть:

$$\chi(\xi) = \chi_1(\xi) + \chi_2(\xi) + \chi_3(\xi) + \chi_4(\xi),$$

где $\chi_1(\xi)$, $\chi_2(\xi)$, $\chi_3(\xi)$, $\chi_4(\xi)$ – функции, аппроксимирующие $\chi(\xi)$ на участках $-\xi_{\max} \leq \xi \leq -\xi_{\text{ТР}}$, $-\xi_{\text{ТР}} \leq \xi \leq 0$, $0 \leq \xi \leq \xi_{\text{ТР}}$, $\xi_{\text{ТР}} \leq \xi \leq \xi_{\max}$ (рис. 2); $-\xi_{\text{ТР}}$, $\xi_{\text{ТР}}$ – точки перехода.

Найдем функции $\chi_1(\xi)$, $\chi_2(\xi)$, $\chi_3(\xi)$, $\chi_4(\xi)$:

$$\chi_1(\xi) = a_0 + a_1\xi; \quad \chi_2(\xi) = b_0 + b_1\xi + b_2\xi^2;$$

$$\chi_3(\xi) = c_0 + c_1\xi + c_2\xi^2; \quad \chi_4(\xi) = d_0 + d_1\xi.$$

Причем в силу косой симметрии функции ошибки коэффициенты аппроксимации соотносятся как

$$a_0 = -d_0; \quad a_1 = d_1; \quad b_0 = -c_0; \quad b_1 = c_1; \quad b_2 = -c_2,$$

тогда

$$\chi_1(\xi) = a_0 + a_1\xi, \quad \chi_2(\xi) = b_0 + b_1\xi + b_2\xi^2,$$

$$\chi_3(\xi) = -b_0 + b_1\xi - b_2\xi^2, \quad \chi_4(\xi) = -a_0 + a_1\xi.$$

Неизвестные коэффициенты аппроксимации a_0 , a_1 , b_0 , b_1 , b_2 зависят как от ДНА сканирующей антенны, базы матрицы, так и от координат точек перехода.

Проверим предложенную версию о допустимости аппроксимации ошибки выбранными полиномами. Для этого воспользуемся численными методами.

Рассмотрим три значения отношения разноса излучателей к ширине ДНА (0,1, 0,5 и 1).

Для каждого из них проведем поиск коэффициентов a_0, a_1, b_0, b_1, b_2 и положения точки перехода $\xi_{\text{ТР}}$. Для этого интервал $0 \leq \xi \leq \xi_{\text{max}}$ разбивается на n точек, для каждой из них находится ошибка пеленга по (1) и с помощью выбранного аппроксимирующего полинома.

Воспользуемся двумя критериями качества аппроксимации.

1. Максимальное значение ошибки аппроксимации ($\max \text{error (ME)}$), нормированное к значению функции (1) в точке максимума ошибки для $0 \leq \xi \leq \xi_{\text{ТР}}$ (т. е. для квадратичного участка):

$$\gamma_{ME}(b_0, b_1, b_2) = \frac{\max |b_0 + b_1 \xi_{i_{\text{max}}} + b_2 \xi_{i_{\text{max}}}^2 - \chi_{i_{\text{max}}}|}{\chi_{i_{\text{max}}}},$$

где i_{max} – индекс точки с максимальным отклонением аппроксимирующей функции от аппроксимируемой; $i = 1, \dots, n$, и

$$\gamma_{ME}(a_0, a_1) = \frac{\max |a_0 + a_1 \xi_{i_{\text{max}}} - \chi_{i_{\text{max}}}|}{\chi_{i_{\text{max}}}}$$

для линейного участка.

2. Среднеквадратическое значение ошибки (СКО), нормированное к значению функции (1) в точке с максимальной ошибкой аппроксимации:

$$\gamma_{\text{СКО}}(b_0, b_1, b_2) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (b_0 + b_1 \xi_i + b_2 \xi_i^2 - \chi_i)^2}{n}} / \chi_{i_{\text{max}1}};$$

$$\gamma_{\text{СКО}}(a_0, a_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_0 + a_1 \xi_i - \chi_i)^2}{n}} / \chi_{i_{\text{max}2}},$$

где $\chi_{i_{\text{max}1}}$ и $\chi_{i_{\text{max}2}}$ – значение функции (1) в точке с максимальным отклонением аппроксимирующей функции от аппроксимируемой для квадратичного и линейного участка соответственно.

Точку перехода $\xi_{\text{ТР}}$ найдем из условия:

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_1} (b_0 + b_1 \xi_{\text{ТР}} + b_2 \xi_{\text{ТР}}^2 - \chi(\xi_{\text{ТР}}))^2}{n_1}} / \chi_{i_{\text{max}1}} -$$

$$- \sqrt{\frac{\sum_{i=n_1+1}^n (a_0 + a_1 \xi_{\text{ТР}} - \chi(\xi_{\text{ТР}}))^2}{n - n_1}} / \chi_{i_{\text{max}2}} \rightarrow \min.$$

Поиск положения точки перехода осуществлялся методом перебора, а весовых коэффициентов методом симплекса Нелдера–Мида [10] с точностью по умолчанию 10^{-6} .

Отношения коэффициентов аппроксимации ДНА r_2 / r_4 для наиболее распространенных функций, используемых при описании игольчатых ДНА [11], приведены в табл. 1.

Аргументы функций подобраны таким образом, чтобы ширина различных по форме ДНА совпадала на уровне 0,707 и равнялась $2\alpha_{0,5}$.

Таблица 1 / Table 1

Соответствие коэффициентов аппроксимации и формы ДНА

The correspondence of the approximation coefficients and the shape of the antenna radiation pattern (ARP)

ДНА $F(\alpha)$	$r_2(2\alpha_{0,5})^2$	$r_4(2\alpha_{0,5})^4$	$(r_2 / r_4) / (2\alpha_{0,5})^2$
$\cos(1,5711\alpha / 2\alpha_{0,5})$	–1,2342	0,2539	–4,8615
$\cos^2(1,144\alpha / 2\alpha_{0,5})$	–1,3087	0,5709	–2,2923
$\cos^3(0,943\alpha / 2\alpha_{0,5})$	–1,3339	0,6919	–1,9278
$\sin c(2,784\alpha / 2\alpha_{0,5})$	–1,2918	0,5006	–2,5804
$\sin c^2(2,004\alpha / 2\alpha_{0,5})$	–1,3387	0,7168	–1,8675
$\exp(-(1,178\alpha / 2\alpha_{0,5})^2)$	–1,3877	0,9628	–1,4413

Из приведенных в таблице данных видно, что минимальное значение модуля P имеет место для ДНА вида гауссова экспонента, а максимальное – для ДНА вида $\cos$.

Именно этими ДНА и ограничим дальнейшие исследования.

Поиск коэффициентов a_0, a_1, b_0, b_1, b_2 проводился для двух значений числа точек разбиения – для ста и тысячи. Сравнение полученных результатов (табл. 2) показало, что увеличение числа разбиений со 100 до 1000 (результаты для 1000 точек указаны в таблице в скобках) в целом не приводит к существенному увеличению точности аппроксимации при ее оценке по среднеквадратичному отклонению и минимаксному критерию. Поэтому количество разбиений было ограничено 1000.

Таблица 2 / Table 2

Оценка качества аппроксимации (1) для 100 и 1000 точек по относительным значениям ошибок аппроксимации (их максимальному (МЕ) значению и среднеквадратическому (СКО))

Estimation of the approximation quality (1) for 100 and 1000 points based on the relative values of approximation errors (their maximum (ME) value and standard mean square (RMS))

δ		Линейный участок		Квадратичный участок	
		МЕ	СКО	МЕ	СКО
$0,1\alpha_{0,5}$	cos	–0,012475 (–0,069189)	–0,008543 (–0,047011)	–0,011145 (–0,012729)	–0,007914 (–0,009026)
	exp	–0,189440 (–0,005086)	–0,124710 (–0,003441)	–0,009926 (–0,030756)	–0,007360 (–0,02138)

Окончание табл. 2 / The end Table 2

δ		Линейный участок		Квадратичный участок	
		МЕ	СКО	МЕ	СКО
$0,5\alpha_{0,5}$	cos	-0,016716 (-0,006909)	-0,011423 (-0,004704)	-0,011859 (-0,027933)	-0,008605 (-0,019585)
	exp	-0,066028 (-0,063941)	-0,044917 (-0,043043)	-0,055347 (-0,058507)	-0,039953 (-0,040588)
$\alpha_{0,5}$	cos	-0,008449 (-0,009417)	-0,005797 (-0,006403)	-0,066812 (-0,064867)	-0,047560 (-0,045710)
	exp	0,992980 (0,464960)	0,538270 (0,280360)	0,002627 (0,002963)	0,002732 (0,002013)

Результаты расчета искомых коэффициентов для рассмотренных исходных данных представлены в табл. 3.

Таблица 3 / Table 3

Коэффициенты аппроксимации ошибки пеленга и точка перехода

The coefficients of approximation of the bearing error and the transition point

δ		a_0	a_1	b_0	b_1	b_2	ξ_{TP}
$0,1\alpha_{0,5}$	cos	-0,539451	-0,901847	0,000604	0,068430	0,453163	0,93
	exp	-0,317387	-0,940941	0,001001	0,081822	0,858402	0,45
$0,5\alpha_{0,5}$	cos	-0,543214	-0,903123	0,001073	0,129766	0,510080	0,87
	exp	-0,355688	-0,961744	-0,008299	0,203279	1,003257	0,57
$\alpha_{0,5}$	cos	-0,615814	-0,933019	-0,007173	0,319711	0,675233	0,93
	exp	-0,386140	-0,904502	0,083939	1,413105	4,082365	0,12

В качестве примера, на рис. 2 показана кривая, полученная по (1) и результаты ее аппроксимации.

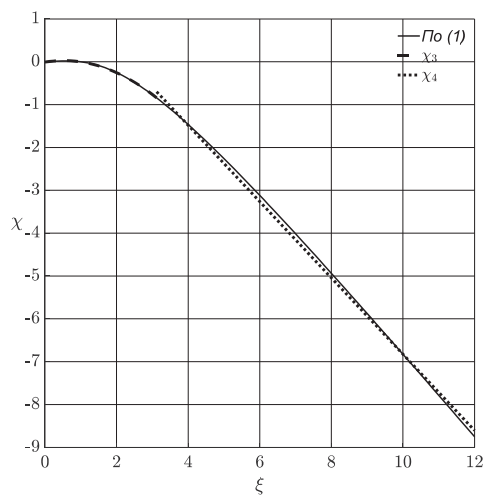


Рис. 2 – Пример аппроксимации ошибки для $\delta = 0,5\alpha_{0,5}$, $F(\alpha) = \cos(1,5711\alpha / 2\alpha_{0,5})$

Fig. 2 – An example of error approximation for $\delta = 0,5\alpha_{0,5}$, $F(\alpha) = \cos(1,5711\alpha / 2\alpha_{0,5})$

Из представленных результатов видно, что, как и предполагалось, выбранные аппроксимации обеспечивают высокую точность.

3. Использование полученных соотношений для вычисления математического ожидания ошибки установки положения КЦИ

В качестве примера использования полученного соотношения рассмотрим вычисление математического ожидания ошибки установки углового положения КЦИ (2):

$$M_1(m, v) = \int_{\xi=-\xi_{\max}}^{-\xi_{\text{TP}}} \chi_1(\xi) W(\xi, m, v) d\xi + \int_{\xi=-\xi_{\text{TP}}}^0 \chi_2(\xi) W(\xi, m, v) d\xi + \\ + \int_{\xi=0}^{\xi_{\text{TP}}} \chi_3(\xi) W(\xi, m, v) d\xi + \int_{\xi=\xi_{\text{TP}}}^{\xi_{\max}} \chi_4(\xi) W(\xi, m, v) d\xi.$$

Подставив аппроксимирующую функцию, получим:

$$M_1 = M_{11} + M_{12} + M_{13} + M_{14};$$

$$M_{11} = \int_{\xi=-\xi_{\max}}^{-\xi_{\text{TP}}} \chi_1(\xi) W(\xi, m, v) d\xi = \int_{\xi=-\xi_{\max}}^{-\xi_{\text{TP}}} (a_0 + a_1 \xi) W(\xi, m, v) d\xi =$$

$$= \frac{1}{2v\sqrt{v^2(m + \xi_{\text{TP}})^2 + 1}\sqrt{v^2(m + \xi_{\max})^2 + 1}} \left((m + \xi_{\max})(a_1 m + a_0)v^2 + a_1 \right) \times$$

$$\times \sqrt{v^2(m + \xi_{\text{TP}})^2 + 1} - \left((m + \xi_{\text{TP}})(a_1 m + a_0)v^2 + a_1 \right) \sqrt{v^2(m + \xi_{\max})^2 + 1};$$

$$M_{12} = \int_{\xi=-\xi_{\text{TP}}}^0 \chi_2(\xi) W(\xi, m, v) d\xi = \int_{\xi=-\xi_{\text{TP}}}^0 (b_0 + b_1 \xi + b_2 \xi^2) W(\xi, m, v) d\xi =$$

$$= - \frac{\left((-b_2 (\arcsin h(v(\xi_{\text{TP}} + m)) - \arcsin h(mv)) \right)}{2v^2 \sqrt{(\xi_{\text{TP}} + m)^2 v^2 + 1} \sqrt{v^2 m^2 + 1}} \times$$

$$\times \sqrt{v^2 m^2 + 1} + v \left(mv^2 (b_2 m^2 + b_1 m + b_0) + b_2 m + b_1 \right) \sqrt{(\xi_{\text{TP}} + m)^2 v^2 + 1} -$$

$$- v \sqrt{v^2 m^2 + 1} \left(v^2 (\xi_{\text{TP}} + m) (b_2 m^2 + b_1 m + b_0) + b_2 m - b_2 \xi_{\text{TP}} + b_1 \right);$$

$$M_{13} = \int_{\xi=0}^{\xi_{\text{TP}}} \chi_3(\xi) W(\xi, m, v) d\xi = \int_{\xi=0}^{\xi_{\text{TP}}} (-b_0 + b_1 \xi - b_2 \xi^2) W(\xi, m, v) d\xi =$$

$$= - \frac{\left((-b_2 (\arcsin h(v(-\xi_{\text{TP}} + m)) - \arcsin h(mv)) \right)}{2v^2 \sqrt{(-\xi_{\text{TP}} + m)^2 v^2 + 1} \sqrt{v^2 m^2 + 1}} \times$$

$$\begin{aligned}
& \times \sqrt{v^2 m^2 + 1} + v \left(m v^2 (b_2 m^2 - b_1 m + b_0) + b_2 m - b_1 \right) \sqrt{(-\xi_{TP} + m)^2 v^2 + 1} - \\
& - v \left(v^2 (-\xi_{TP} + m) (b_2 m^2 - b_1 m + b_0) + b_2 m + b_2 \xi_{TP} - b_1 \right) \sqrt{v^2 m^2 + 1} ; \\
M_{14}(m, v) &= \int_{\xi=\xi_{TP}}^{\xi_{\max}} \chi_4(\xi) W(\xi, m, v) d\xi = \int_{\xi=\xi_{TP}}^{\xi_{\max}} (-a_0 + a_1 \xi) W(\xi, m, v) d\xi = \\
&= \frac{\left((m - \xi_{\max})(-a_1 m + a_0) v^2 - a_1 \right)}{2v \sqrt{v^2 (m - \xi_{TP})^2 + 1} \sqrt{v^2 (m - \xi_{\max})^2 + 1}} \times \\
& \times \sqrt{v^2 (m - \xi_{TP})^2 + 1} - ((m - \xi_{TP}))(-a_1 m + a_0) v^2 - a_1 \sqrt{v^2 (m - \xi_{\max})^2 + 1} .
\end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned}
M_1(m, v) &= \\
&= - \left(\left(\left(\left(\left(2b_2 \left(\arcsin h(mv) - \frac{\arcsin h(v(m - \xi_{TP}))}{2} - \frac{\arcsin h(v(m + \xi_{TP}))}{2} \right) \right) \right) \right) \right) \times \right. \\
& \times \sqrt{v^2 m^2 + 1} + 2 \left((b_2 m^2 + b_0) v^2 + b_2 \right) m v \sqrt{v^2 (m + \xi_{TP})^2 + 1} + \sqrt{v^2 m^2 + 1} \times \\
& \times \left((-b_2 m^2 + (a_1 - b_1)m + a_0 - b_0(m + \xi_{TP}) v^2 - (b_2 m + b_2 \xi_{TP} + a_1 - b_1)) v \right) \times \\
& \times \sqrt{1 + (m + \xi_{\max})^2 v^2} - \sqrt{m^2 v^2 + 1} \sqrt{1 + (m + \xi_{TP})^2 v^2} \times \\
& \times v \left((m + \xi_{\max})(a_1 m + a_0) v^2 + a_1 \right) \times \\
& \times \sqrt{1 + v^2 (m - \xi_{TP})^2} + v \sqrt{1 + v^2 m^2} \sqrt{1 + v^2 (m + \xi_{TP})^2} \sqrt{1 + v^2 (m + \xi_{\max})^2} \times \\
& \times \left((m - \xi_{TP}) (-b_2 m^2 + (-a_1 + b_1)m + a_0 - b_0) v^2 - b_2 m - b_2 \xi_{TP} - a_1 + b_1 \right) \times \\
& \times \sqrt{1 + (m - \xi_{\max})^2 v^2} - \sqrt{m^2 v^2 + 1} \sqrt{v^2 (m + \xi_{TP})^2 + 1} \times \\
& \times \left((m - \xi_{\max})(-a_1 m + a_0) v^2 - a_1 \right) \sqrt{1 + v^2 (m - \xi_{TP})^2} v \sqrt{1 + v^2 (m + \xi_{\max})^2} \Big) / \\
& \Big/ \left(2v^2 \sqrt{1 + v^2 (m + \xi_{\max})^2} \sqrt{1 + v^2 (m + \xi_{TP})^2} \times \right. \\
& \times \sqrt{1 + v^2 (m - \xi_{TP})^2} \sqrt{1 + v^2 m^2} \sqrt{1 + v^2 (m - \xi_{\max})^2} \Big) .
\end{aligned}$$

Использование аппроксимации позволило получить аналитическую зависимость.

4. Заключение

1. Зависимость ошибки установки углового положения КЦИ может быть разбита на четыре участка, в пределах каждого из которых допустима ее аппроксимация полиномами первой или второй степени.

2. В целом в данной работе получено упрощенное выражение, позволяющее оценить ошибки установки углового положения КЦИ, возникающие в матричном имитаторе из-за замещения излучающей точки несколькими (двумя) неразрешаемыми излучателями.

3. Полученные результаты могут быть использованы для непосредственного вычисления ошибки, а также ее моментов. При этом полученные упрощения позволяют получить аналитические выражения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Штрагер Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. – М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.
2. Bahtiyar S. Target glint phenomenon analysis and evaluation of glint reduction techniques: M. S. – Middle East Technical University, 2012. – 87 p.
3. Островитянов Р.В., Басалов Ф.А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.
4. Степанов М.А. Точность позиционирования кажущегося центра излучения в когерентном трехточечном матричном имитаторе // Вопросы радиоэлектроники. – 2015. – № 5. – С. 57–67.
5. McKenna J., Wayne D., McBride S. Multiple target, dynamic RF scene generator // AMTA 2016 Proceedings. – Austin, TX, 2016. – P. 319–324.
6. Патент № 2787576 Российская Федерация: № 2021131580: заявл. 28.10.2021: опубл. 11.01.2023, Бюл. № 2. Имитатор радиолокационных целей / Боков А.С., Марков Ю.В., Сорокин А.К.
7. Тырыкин С.В. Модели радиолокационных объектов, построенные из зависимых отражателей, и имитация эхосигналов на их основе: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.12.14. – Новосибирск, 2005. – 22 с.
8. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Искажения диаграмм направленности фазированных антенных решеток под влиянием периодических и флуктуационных помех // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 2. – DOI: 10.30898/1684-1719.2021.2.10.
9. Киселев А.В., Тайуров А.В. Систематические ошибки установки углового положения в матричных имитаторах радиоэлектронной обстановки // Доклады АН ВШ РФ. – 2023. – № 4 (61). – С. 34–44 – DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-34-44.
10. Nelder J.A., Mead R. A Simplex method for function minimization // The Computer Journal. – 1965. – Vol. 7 (4). – P. 308–313. – DOI: 10.1093/comjnl/7.4.308.
11. Рекомендация МСЭ-R M.1851-1. Математические модели диаграмм направленности антенн радиолокационных систем радиоопределения для использования при анализе помех (2009–2018). – Женева, 2018. – С. 2–9.

RATIOS FOR ESTIMATING ERRORS IN SETTING THE ANGULAR POSITION IN MATRIX SIMULATORS OF AN ELECTRONIC ENVIRONMENT

Kiselev A.V., Tayurov A.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Simplified formulas have been obtained to estimate the error in setting the angular position of the apparent center of radiation in a matrix simulator. The approximation of the error function is used for this purpose. It is shown that the well-known formula for calculating the error in simula-

ting radar reflections from point targets, when used to find the statistical characteristics of noise coordinates of distributed targets, requires simplifications. In this case, the error function can be divided into four sections, within which its approximation by polynomials of the first or second degree is allowed. At the same time, the error function has an oblique symmetry, which makes it possible to analyze only two sections, and to extend the results to four. The numerical enumeration method is used as a way to find an optimal division into sections. For the typical shapes of the main lobe of the directional pattern of the radar antenna, the coefficients of the approximating polynomials were obtained by the Nelder-Mead simplex method. It is shown that the use of approximation makes it possible to obtain analytical expressions for the moments of error in setting the angular position of the apparent radiation center. In particular, the relations for finding the mathematical expectation of an error are given.

Keywords: matrix simulator, systematic error angular position setting, apparent radiation center, simulation modeling, glint.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-43-53

REFERENCES

1. Shtager E.A. *Rasseyaniye radiovoln na telakh slozhnoi formy* [Scattering of radio waves on bodies of complex shape]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986. 184 p.
2. Bahtiyar S. *Target glint phenomenon analysis and evaluation of glint reduction techniques*. M. S. Middle East Technical University, 2012. 87 p.
3. 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.
4. Stepanov M.A. Tochnost' pozitsionirovaniya kazhushchegosya tsentra izlucheniya v kogerentnom trekhtocheynom matrichnom imitatore [Positioning accuracy of the apparent center of radiation in the coherent three-point matrix simulator]. *Voprosy radioelektroniki = Issues of radio electronics*, 2015, no. 5, pp. 57–67.
5. McKenna J., Wayne D., McBride S. Multiple target, dynamic RF scene generator. *AMTA 2016 Proceedings*, Austin, TX, 2016, pp. 319–324.
6. Bokov A.S., Markov Yu.V., Sorokin A.K. *Imitator radiolokatsionnykh tselei* [Radiolocation target simulator]. Patent RF, no. 2787576, 2023.
7. Tyrykin S.V. *Modeli radiolokatsionnykh ob"ektov, postroennye iz zavisimykh ot-razhatelei, i imitatsiya ekhsignalov na ikh osnove*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Simulation of radar objects constructed from dependent reflectors and simulation of echo signals based on them. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2005. 22 p.
8. Artyushenko V.M., Volovach V.I. Iskazheniya diagramm napravlenosti fazirovannykh antennoykh reshetok pod vliyaniem periodicheskikh i fluktuatsionnykh pomekh [Distortion of the radiation patterns of phased antenna arrays under the influence of periodic and fluctuating noise]. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*, 2021, no. 2. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.2.10.
9. Kiselev A.V., Tayurov A.V. Sistematische 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 vysshei 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.
10. Nelder J.A., Mead R. A Simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, 1965, vol. 7 (4), pp. 308–313. DOI: 10.1093/comjnl/7.4.308.
11. Rekomendatsiya MSE-R M.1851-1. *Matematicheskie modeli diagramm napravlenosti anten radiolokatsionnykh sistem radioopredeleniya dlya ispol'zovaniya pri analize pomekh* [Mathematical models of radiation patterns of antennas of radar detection systems for use in interference analysis]. (2009–2018). Zheneva, 2018, pp. 2–9.

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@mail.ru).

Kiselev Alexey Vasilevich (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 160 scientific papers. (Address: 20, Kark Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nil_rtu@mail.ru).



Тайуров 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 10 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 Receiving and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on mathematical modeling of radar reflections, radar, and radio communication. He is the author of 10 scientific papers. (Address: 20, Kark Marx Av., Novosibirsk, 630073. Russia, E-mail: nil_rtu@ngs.ru).

*Статья поступила 15 апреля 2024 г.
Received April 15, 2024*

To Reference:

Kiselev A.V., Tayurov A.V. Sootnosheniya dlya otsenki oshibok ustanki uglovogo polozheniya v matrichnykh imitatorakh radioelektronnoi obstanovki [Ratios for estimating errors in setting the angular position in matrix simulators of an electronic environment]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 2 (63), pp. 43–53. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-43-53.