

УДК 621.396.96

**ОШИБКА УСТАНОВКИ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ
РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБЪЕКТА, ЗАМЕЩАЕМОГО
ДВУХТОЧЕЧНОЙ МОДЕЛЬЮ, ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АНТЕННЫ
С РАЗНОСТНОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ**

А.В. Киселев, А.В. Таюров

Новосибирский государственный технический университет

Рассмотрены вопросы оценки систематических ошибок установки углового положения кажущегося центра излучения радиолокационного объекта, имитируемого двухточечной моделью, при использовании антенн с разностными диаграммами направленности. Установлена зависимость угловой ошибки от параметров модели, таких как разное излучателей, ожидаемое положение кажущегося центра излучения и коэффициенты аппроксимации диаграммы направленности антенны. Угловая ошибка пеленга определена путем ее включения в пеленгационную характеристику антенны в качестве поправки к угловому положению. Расчеты выполнены для суммарной и разностной диаграмм направленности, на основе которых проведено сравнение величин ошибок. Определено соотношение коэффициентов аппроксимации для суммарной и разностной диаграмм направленности антенны. Полученные аналитические выражения могут быть использованы при решении прикладных задач, связанных с разработкой матричных имитаторов и прогнозированием точностных характеристик имитационных комплексов.

Ключевые слова: матричный имитатор, ошибка установки углового положения, кажущийся центр излучения, имитационное моделирование, разностная диаграмма направленности.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-15-25

Введение

Ранее, в [1], было показано, что замещение радиолокационного объекта двухточечной моделью, используемое при построении матричных имитаторов (далее сокращенно МИ) [2–4], приводит к специфическим ошибкам измерения радиотехнической системой (РТС) его угловых координат.

Полученные в [1] результаты определяют связь этих ошибок с угловыми размерами матрицы, шириной диаграммы направленности (ДН) антенны и коэффициентами аппроксимации ее ДН. Они получены для измерения угловых координат кажущегося центра излучения (КЦИ) [5] сканирующей игольчатой ДН антенны.

Цель настоящей работы – развить результаты, полученные для игольчатой ДН, применительно к разностным диаграммам направленности.

Основные моменты исследования, представленного в [1], заключаются в следующем.

Рассматривается МИ, моделируемый двухточечной моделью (рис. 1).

Предполагается, что такая модель состоит из двух излучающих точек, разнесенных по угловой координате на нормированное к ширине ДН ($2\alpha_{0.5}$) РТС расстояние 2δ . Тогда, как показано в [1], ошибка установки углового положения

КЦИ объекта, нормированная к излучателю МИ, равная разности между измеренным положением КЦИ ($\xi_{\text{изм}}$) и ожидаемым (ξ), составит:

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

где

$$P = \frac{1}{\delta^2} \frac{r_2}{6r_4},$$

r_2, r_4 – коэффициенты аппроксимации ДН; j – мнимая единица.

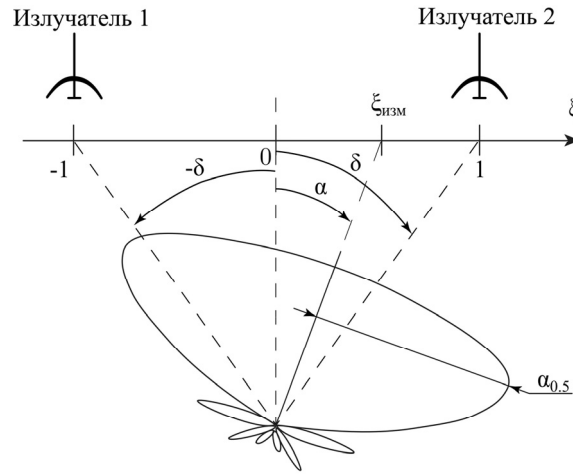


Рис. 1 – Двухточечная модель

Fig. 1 – Two-point model

1. Постановка задачи

При выводе формулы (1) угловое положение КЦИ принималось равным значению угла поворота сканирующей антенны, имеющей игольчатую ДН, при которой амплитуда сигнала на ее выходе принимает максимальное значение [6, 7].

Для этого определялась и приравнивалась к нулю производная от зависимости этой амплитуды от угла поворота оси ДН.

Для того чтобы получить результат для разностной ДН, воспользуемся несколько иным подходом. Его суть заключается во введении в выражение пеленгационной характеристики величины угловой ошибки определения положения КЦИ $\Delta\alpha$ с последующим ее нахождением. То есть будем считать, что при наведении оси антенны на КЦИ $\alpha_0 = \alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha$, где $\Delta\alpha$ – угловая величина ошибки определения положения.

2. Решение

Рассмотрим сначала случай суммарной ДН.

При использовании полиномиальной аппроксимации ДН $F(\alpha)$ получим следующее.

При направлении оси ДН на КЦИ имеем:

$$\left. \frac{dU_{\Sigma}(\alpha_0, \xi, \delta)}{d\alpha_0} \right|_{\alpha_0=\alpha_{\text{ц}}+\Delta\alpha} = 2r_2 \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta) \dot{S}_1 + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta) \dot{S}_2 \right] +$$

$$+ 4r_4 \cdot \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 \dot{S}_1 + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 \dot{S}_2 \right] = 0, \quad (2)$$

где амплитуды сигналов излучателей:

$$\dot{S}_1 = (1 - \xi) / 2 = (1 - \alpha_{\text{ц}} / \delta) / 2, \quad \dot{S}_2 = 1 - \dot{S}_1 = (1 + \alpha_{\text{ц}} / \delta) / 2. \quad (3)$$

Величины угловых положений излучателей и угловых положений КЦИ (при имитации в пределах матрицы) малы, поэтому в слагаемых с низкой степенью они могут быть опущены:

$$2r_2 \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta) \dot{S}_1 + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta) \dot{S}_2 \right] +$$

$$+ 4r_4 \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 \dot{S}_1 + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 \dot{S}_2 \right] = 0.$$

$$2r_2 \left[\Delta\alpha \dot{S}_1 + \Delta\alpha \dot{S}_2 \right] + 4r_4 \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 \dot{S}_1 + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 \dot{S}_2 \right] = 0.$$

$$2r_2 \Delta\alpha (\dot{S}_1 + \dot{S}_2) + 4r_4 \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 \dot{S}_1 + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 \dot{S}_2 \right] = 0.$$

Разделим выражение на $4r_4$:

$$\frac{r_2}{2r_4} \Delta\alpha (\dot{S}_1 + \dot{S}_2) + \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 \dot{S}_1 + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 \dot{S}_2 \right] = 0.$$

Сумма амплитуд сигналов излучателей равна единице: $\dot{S}_1 + \dot{S}_2 = 1$, тогда

$$\frac{r_2}{2r_4} \Delta\alpha + \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 \dot{S}_1 + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 \dot{S}_2 \right] = 0.$$

Сгруппируем:

$$\frac{r_2}{2r_4} \Delta\alpha + \left[((\alpha_{\text{ц}} + \delta) + \Delta\alpha)^3 \dot{S}_1 + ((\alpha_{\text{ц}} - \delta) + \Delta\alpha)^3 \dot{S}_2 \right] = 0.$$

Раскроем скобки с учетом того, что величина ошибки много меньше других угловых величин ($\Delta\alpha \ll \alpha_{\text{ц}}, \delta$):

$$((\alpha_{\text{ц}} \pm \delta) + \Delta\alpha)^3 = (\alpha_{\text{ц}} \pm \delta)^3 + 3(\alpha_{\text{ц}} \pm \delta)^2 \Delta\alpha + 3(\alpha_{\text{ц}} \pm \delta) \Delta\alpha^2 + \Delta\alpha^3 \approx$$

$$\approx (\alpha_{\text{ц}} \pm \delta)^3 + 3(\alpha_{\text{ц}} \pm \delta)^2 \Delta\alpha. \quad (4)$$

Подставив амплитуды сигналов излучателей матрицы (3) и выразив величину ошибки пеленга, получим

$$\Delta\alpha(\alpha_{\text{ц}}, r_2 / r_4, \delta) = -\frac{4\alpha_{\text{ц}}(\delta - \alpha_{\text{ц}})(\delta + \alpha_{\text{ц}})}{6\delta^2 - 6\alpha_{\text{ц}}^2 + r_2 / r_4} = -\frac{4\delta^2\alpha_{\text{ц}} + 4\alpha_{\text{ц}}^3}{6\delta^2 - 6\alpha_{\text{ц}}^2 + r_2 / r_4}.$$

Выполним замену $\alpha_{\text{ц}} = \xi\delta$:

$$\Delta\alpha(\xi, r_2 / r_4, \delta) = \frac{4(\xi^3 - \xi)\delta^3}{6(-\xi^2 + 1)\delta^2 + r_2 / r_4}.$$

Нормированная к угловому размеру базы матрицы величина ошибки пеленга КЦИ:

$$\chi(\xi, r_2 / r_4, \delta) = \frac{\Delta\alpha}{\delta} = \frac{4(\xi^3 - \xi)\delta^3}{6(-\xi^2 + 1)\delta^2 + r_2 / r_4} \frac{1}{\delta} = \frac{4(\xi^3 - \xi)\delta^2}{6(-\xi^2 + 1)\delta^2 + r_2 / r_4}.$$

Разделим числитель и знаменатель на δ^2 :

$$\chi(\xi, r_2 / r_4, \delta) = \frac{2(\xi^3 - \xi)}{3(-\xi^2 + 1) + \frac{1}{\delta^2} \frac{r_2}{2r_4}}. \quad (5)$$

Ошибки для разностной ДН.

При направлении оси ДН на КЦИ амплитуда сигнала на выходе приемной антенны обращается в нуль [8]:

$$U_{\Delta}(\alpha_0, \xi, \delta) \sim F_{\Delta}(\alpha_0 + \delta)\dot{S}_1(\xi) + F_{\Delta}(\alpha_0 - \delta)\dot{S}_2(\xi) = 0, \quad (6)$$

где ДН аппроксимируется полиномом третьей степени:

$$F_{\Delta}(\alpha) = g_1\alpha + g_3\alpha^3,$$

g_1, g_3 – коэффициенты аппроксимации ДН.

Вводя в (6) параметр угловой ошибки $\alpha_0 = \alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha$, получим

$$\begin{aligned} &g_1 \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)\dot{S}_1(\xi) + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)\dot{S}_2(\xi) \right] + \\ &+ g_3 \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 \dot{S}_1(\xi) + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 \dot{S}_2(\xi) \right] = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Проведем ряд упрощений.

$$\begin{aligned} &g_1 \left[\Delta\alpha (\dot{S}_1(\xi) + \dot{S}_2(\xi)) \right] + \\ &+ g_3 \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 \dot{S}_1(\xi) + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 \dot{S}_2(\xi) \right] = 0. \end{aligned}$$

$$g_1 \Delta\alpha + g_3 \left[(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 S_1(\xi) + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 S_2(\xi) \right] = 0.$$

$$\frac{g_1}{g_3} \Delta\alpha + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \delta)^3 S_1(\xi) + (\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \delta)^3 S_2(\xi) = 0.$$

$$\frac{g_1}{g_3} \Delta\alpha + ((\alpha_{\text{ц}} + \delta) + \Delta\alpha)^3 S_1(\xi) + ((\alpha_{\text{ц}} - \delta) + \Delta\alpha)^3 S_2(\xi) = 0.$$

Раскроем скобки, основываясь на (4):

$$\begin{aligned} \frac{g_1}{g_3} \Delta\alpha + ((\alpha_{\text{ц}} + \delta)^3 + 3(\alpha_{\text{ц}} + \delta)^2 \Delta\alpha) S_1(\xi) + \\ + ((\alpha_{\text{ц}} - \delta)^3 + 3(\alpha_{\text{ц}} - \delta)^2 \Delta\alpha) S_2(\xi) = 0. \end{aligned}$$

Подставив амплитуды сигналов излучателей матрицы (3) и выразив величину ошибки пеленга, получим

$$\Delta\alpha = \frac{2(\xi^3 - \xi)\delta^3}{3(-\xi^2 + 1)\delta^2 + g_1 / g_3}.$$

Нормированная к угловому размеру базы матрицы величина ошибки пеленга КЦИ:

$$\chi(\xi, g_1 / g_3, \delta) = \frac{\Delta\alpha}{\delta} = \frac{2(\xi^3 - \xi)\delta^2}{3(-\xi^2 + 1)\delta^2 + g_1 / g_3} = \frac{2(\xi^3 - \xi)}{3(-\xi^2 + 1) + \frac{1}{\delta^2} \frac{g_1}{g_3}}.$$

Сравним (2) и (7).

Оба соотношения являются пеленгационной характеристикой, но получены различными способами: первое – по суммарной ДН, второе – по разностной.

Установим соответствие коэффициентов аппроксимации:

$2r_2 = g_1$; $4r_4 = g_3$, либо

$$\frac{r_2}{2r_4} = \frac{g_1}{g_3}.$$

При этом $r_0 \neq g_0$; $r_1 \neq g_1$; $r_2 \neq g_2$; $r_3 \neq g_3$; $r_4 \neq g_4$.

Это позволяет установить следующее. Выражение (1), ранее использованное для вычисления ошибки пеленгации по суммарной диаграмме направленности, может быть адаптировано для разностной диаграммы направленности. Для этого необходимо лишь заменить коэффициенты аппроксимации диаграммы направленности, основываясь на полученных соответствиях.

Ошибки для разностной ДН, которая получена из двух суммарных.

Рассмотрим часто используемый на практике [9–11] случай формирования разностной ДН как разности двух взаимно отклоненных суммарных ДН.

В этом случае зависимость амплитуды сигнала разностного канала от углового положения оси ДН имеет вид

$$U_{\Delta}(\alpha_0, \xi, \delta) \sim [F(\alpha_0 - \varepsilon + \delta) - F(\alpha_0 + \varepsilon + \delta)]\dot{S}_1(\xi) + \\ + [F(\alpha_0 - \varepsilon - \delta) - F(\alpha_0 + \varepsilon - \delta)]\dot{S}_2(\xi),$$

где ε – угол отклонения оси суммарной ДН от равносигнального направления.

Тогда:

$$U_{\Delta}(\alpha_0, \xi, \delta) \sim F(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \varepsilon + \delta)\dot{S}_1(\xi) + F(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \varepsilon - \delta)\dot{S}_2(\xi) - \\ - F(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \varepsilon + \delta)\dot{S}_1(\xi) - F(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \varepsilon - \delta)\dot{S}_2(\xi).$$

При использовании аппроксимации ДН полиномом четвертой степени нормированная амплитуда сигнала на входе приемной антенны равна

$$U_{\Delta}(\alpha_0, \xi, \delta) \sim [r_0 + r_2(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \varepsilon + \delta)^2 + r_4(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \varepsilon + \delta)^4]\dot{S}_1 + \\ + [r_0 + r_2(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \varepsilon - \delta)^2 + r_4(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \varepsilon - \delta)^4]\dot{S}_2 - \\ - [r_0 + r_2(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \varepsilon + \delta)^2 + r_4(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \varepsilon + \delta)^4]\dot{S}_1 - \\ - [r_0 + r_2(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \varepsilon - \delta)^2 + r_4(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha - \varepsilon - \delta)^4]\dot{S}_2 = 0.$$

Упростим с учетом того, что $\Delta\alpha \ll \alpha_{\text{ц}}$, δ :

$$(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \varepsilon + \delta)^2 = ((\alpha_{\text{ц}} + \varepsilon + \delta) + \Delta\alpha)^2 \approx (\alpha_{\text{ц}} + \varepsilon + \delta)^2 + 2\Delta\alpha(\alpha_{\text{ц}} + \varepsilon + \delta),$$

$$(\alpha_{\text{ц}} + \Delta\alpha + \varepsilon + \delta)^4 = ((\alpha_{\text{ц}} + \varepsilon + \delta) + \Delta\alpha)^4 \approx (\alpha_{\text{ц}} + \varepsilon + \delta)^4 + 4(\alpha_{\text{ц}} + \varepsilon + \delta)^3\Delta\alpha.$$

Подставив амплитуды сигналов излучателей (3) и угловое положение КЦИ ($\alpha_{\text{ц}} = \xi\delta$), получим

$$U_{\Delta}(\alpha_0, \xi, \delta) = 4\varepsilon \left[\left((-6\xi^2 + 6)\delta^2 + 2\varepsilon^2 \right) \Delta\alpha + \right. \\ \left. + (-4\xi^3 + 4\xi)\delta^3 \right] r_4 + r_2 \Delta\alpha = 0. \quad (8)$$

Разностная ДН образуется из суммарной (четной функции), поэтому в выражении (8) присутствуют только четные коэффициенты аппроксимации.

Выразим угловую величину ошибки пеленга КЦИ:

$$\Delta\alpha = \frac{2(\xi^3 - \xi)\delta^3}{3(-\xi^2 + 1)\delta^2 + \varepsilon^2 + \frac{r_2}{2r_4}}.$$

Нормированная к угловому размеру базы матрицы величина ошибки пеленга КЦИ:

$$\begin{aligned} \chi(\xi, r_2 / r_4, \delta, \varepsilon) &= \frac{\Delta\alpha}{\delta} = \frac{2(\xi^3 - \xi)\delta^2}{3(-\xi^2 + 1)\delta^2 + \varepsilon^2 + \frac{r_2}{2r_4}} = \\ &= \frac{2(\xi^3 - \xi)}{3(-\xi^2 + 1) + \frac{1}{\delta^2} \left(\varepsilon^2 + \frac{r_2}{2r_4} \right)}. \end{aligned}$$

3. Анализ соотношений

Сведем в таблицу полученные соотношения для нахождения ошибки пеленга в пределах матрицы.

Выражения для определения систематической ошибки пеленга КЦИ

Expressions for determining the systematic error of the KCI bearing

Вид ДН	Аппроксимирующий полином $F(\alpha)$	Нормированная к разному излучателей величина ошибки
Суммарная	$r_0 + r_2\alpha^2 + r_4\alpha^4$	$\chi_1 = \frac{2(\xi^3 - \xi)}{3(-\xi^2 + 1) + \frac{1}{\delta^2} \frac{r_2}{2r_4}}$
Разностная	$g_1\alpha + g_3\alpha^3$	$\chi_2 = \frac{2(\xi^3 - \xi)}{3(-\xi^2 + 1) + \frac{1}{\delta^2} \frac{g_1}{g_3}}$
Разностная по аппроксимированной суммарной	$r_0 + r_2\alpha^2 + r_4\alpha^4$	$\chi_3 = \frac{2(\xi^3 - \xi)}{3(-\xi^2 + 1) + \frac{1}{\delta^2} \left(\varepsilon^2 + \frac{r_2}{2r_4} \right)}$

На рис. 2 показаны результаты расчета ошибок по выражениям из таблицы. Помимо этого, сплошной линией обозначены результаты численного эксперимента χ_0 , полученные по суммарной ДН без аппроксимации. В качестве модели ДН использована экспонента Гаусса. Направление на КЦИ определялось по максимуму сигнала при сканировании пространства ДН антенны. Ошибка пеленга вычислялась как разность между ожидаемым и измеренным положениями КЦИ. Кривая введена в качестве референтной.

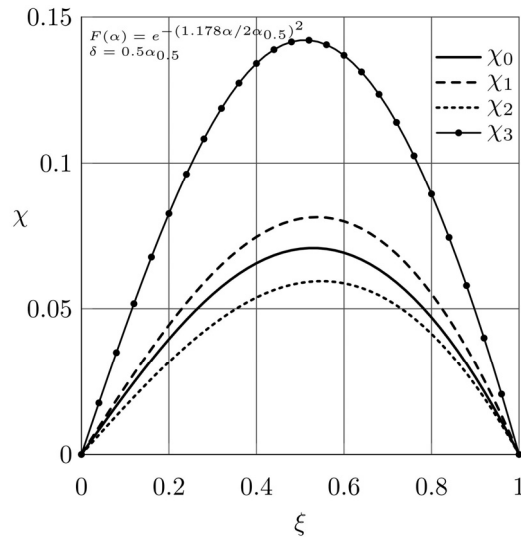


Рис. 2 – Зависимость ошибки пеленга от углового положения КЦИ

Fig. 2 – The dependence of the bearing error on the angular position of the apparent radiation center

Максимальное отклонение от χ_0 наблюдается у функции χ_3 , что можно объяснить следующим образом: область пересечения разностной ДН нуля образуется путем вычитания «скатов» суммарных ДН. Поскольку суммарная ДН аппроксимируется в области максимума, качество аппроксимации на «скате» снижено. В результате этого в области нуля будут наблюдаться искажения разностной ДН.

Применение суммарной ДН, аппроксимированной полиномом четвертой степени, всегда дает завышенную ошибку: $\chi_1 > \chi_0$. Это является положительным аспектом, поскольку оценка ошибки в таком случае будет пессимистичной, обеспечивая гарантию ее непревышения.

Наименьшая ошибка пеленга (χ_2) получена при использовании разностной ДН, которая аппроксимирована полиномом третьей степени. Таким образом, наиболее точным методом пеленгации является метод, основанный на разностной диаграмме направленности, что согласуется с утверждениями, приведенными в литературе [11].

Заключение

1. Предложено включать угловую ошибку в пеленгационную характеристику антенны в виде поправки к угловому положению. В результате получена зависимость угловой ошибки от параметров системы, таких как разнос излучателей модели, ожидаемое положение кажущегося центра излучения и коэффициенты аппроксимации диаграммы направленности антенны.

2. Угловое положение кажущегося центра излучения, создаваемого двумя или более излучающими точками, может быть определено с применением как суммарной, так и разностной диаграмм направленности антенны. При этом результаты пеленга будут различаться, и величина этих различий будет зависеть от метода

описания диаграмм направленности. Рассмотрены различные подходы: в одном варианте разностная ДН аппроксимирована непосредственно, а в другом – составлена на основе двух аппроксимированных суммарных ДН, разнесенных на заданный угол.

3. Коэффициенты аппроксимации суммарной ДН связаны с аналогичными коэффициентами аппроксимации разностной ДН, что позволяет учитывать их взаимосвязь при вычислениях и использовать единые формулы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Киселев А.В., Таюров 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.
2. **Ergezer H., Keskin M.F., Gunay O.** Hardware-in-the-loop radar test simulator // 2014 4th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH). – IEEE, 2014. – Vol. 1. – P. 666–673. – DOI: 10.5220/0005034506660673.
3. **Huang H., Pan M., Lu Z.** Hardware-in-the-loop simulation technology of wide-band radar targets based on scattering center model // Chinese Journal of Aeronautics. – 2015. – Vol. 28 (5). – P. 1476–1484.
4. **Wayne D., McBride S., McKenna J.** Multiple target, dynamic RF scene generator // AMTA 2016 Proceedings. – Austin, TX, 2016. – P. 319–324.
5. **Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Коновалюк М.А.** Определение параметров многоточечных целей по спектру радиолокационного изображения // Вестник МАИ. – 2010. – Т. 17, № 3. – С. 193–198.
6. **Loginov A.A., Semenova M.Yu.** Applying correlation method to the problem of passive amplitude monopulse direction finding // IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks. – IEEE, 2011. – P. 66–68. – DOI: 10.1109/ICCSN.2011.6014850.
7. Comparative analysis of adjacent and maximum / Y. Guo, B. Li, W. Cui, H. Wu // International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). – IEEE, 2020. – DOI: 10.1109/ICMMT49418.2020.9386490.
8. Generalized monopulse method with coherent integration in mechanical scanning radar / W. Zhou, G. Li, J. Xie, Y. Du // CIE International Conference on Radar (RADAR). – IEEE, 2016. – DOI: 10.1109/RADAR.2016.8059571.
9. **Mitrović N.M., Ponjavić M.M.** Multichannel 2-D direction finding based on differential amplitude detection // IEEE Sensors Journal. – 2015. – Vol. 15 (9). – P. 5064–5070. – DOI: 10.1109/jsen.2015.2434876.
10. Справочник по радиолокации. В 2 кн. Кн. 1 / под ред. М.И. Сколника; пер. с англ. под общ. ред. В.С. Вербы. – М.: Техносфера, 2014. – 672 с.
11. **Леонов А.И., Фомичев К.И.** Моноимпульсная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1984. – 312 с.

ERROR IN SETTING THE ANGULAR POSITION OF A RADAR OBJECT REPLACED BY A TWO-POINT MODEL WHEN USING AN ANTENNA WITH A DIFFERENCE RADIATION PATTERN

Kiselev A.V., Tayurov A.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The issues of estimating systematic errors in setting the angular position of the apparent radiation center of a radar object simulated by a two-point model when using antennas with difference radiation patterns are considered. The dependence of the angular error on the model parameters,

such as the spacing of the emitters, the expected position of the apparent center of radiation and the coefficients of the antenna radiation pattern approximation, is established. The angular error of the bearing is determined by including it in the direction finding characteristic of the antenna as a correction to the angular position with further analytical expression. Calculations were performed for the sum and difference directional diagrams, on the basis of which the error values were compared. The ratio of the approximation coefficients for the sum and difference radiation patterns of the antenna is determined. The obtained analytical results can be used in solving applied problems related to the development of matrix simulators and forecasting the accuracy characteristics of simulation complexes.

Keywords: matrix simulator, error in setting the angular position, apparent center of radiation, simulation, antenna difference pattern.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-15-25

REFERENCES

1. Kiselev A.V., Tayurov A.V. Sistematicheskie 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.
2. Ergezer H., Keskin M.F., Gunay O. Hardware-in-the-loop radar test simulator. *2014 4th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH)*. IEEE, 2014, vol. 1, pp. 666–673. DOI: 10.5220/0005034506660673.
3. Huang H., Pan M., Lu Z. Hardware-in-the-loop simulation technology of wide-band radar targets based on scattering center model. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, vol. 28 (5), pp. 1476–1484.
4. Wayne D., McBride S., McKenna J. Multiple target, dynamic RF scene generator. *AMTA 2016 Proceedings*, Austin, TX, 2016, pp. 319–324.
5. Kuznetsov Yu.V., Baev A.B., Konovaluk M.A. Opredelenie parametrov mnogotochechnykh tselei po spektru radiolokatsionnogo izobrazheniya [Multi-point scatterer target identification using radar image spectrum]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta = Aerospace MAI Journal*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 193–198.
6. Loginov A.A., Semenova M.Yu. Applying correlation method to the problem of passive amplitude monopulse direction finding. *IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks*. IEEE, 2011, pp. 66–68. DOI: 10.1109/ICCSN.2011.6014850.
7. Guo Y., Li B., Cui W., Wu H. Comparative analysis of adjacent and maximum. *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*. IEEE, 2020. DOI: 10.1109/ICMMT49418.2020.9386490.
8. Zhou W., Li G., Xie J., Du Y. Generalized monopulse method with coherent integration in mechanical scanning radar. *CIE International Conference on Radar (RADAR)*. IEEE, 2016. DOI: 10.1109/RADAR.2016.8059571.
9. Mitrović N.M., Ponjavić M.M. Multichannel 2-D direction finding based on differential amplitude detection. *IEEE Sensors Journal*, 2015, vol. 15 (9), pp. 5064–5070. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2434876.
10. Skolnik M.I. *Radar handbook*. 3rd ed. New York, McGraw Hill, 2008 (Russ. ed.: *Spravochnik po radiolokatsii*. V 2 kn. Kn. 1. Ed. by M.I. Skolnik. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2014. 672 p.).
11. Leonov A.I., Fomichev K.I. *Monoimpul'snaya radiolokatsiya* [Monopulse radar]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1984. 312 p.

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.), 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 160 scientific papers. (Address: 20, Karl 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 11 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 11 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: nil_rtu@ngs.ru).

*Статья поступила 21 октября 2024 г.
Received October 21, 2024*

To Reference:

Kiselev A.V., Tayurov A.V. Oshibka ustanovki uglovogo polozheniya radiolokatsionnogo ob"ekta, zameshchaemogo dvukhtocheynoi model'yu, pri ispol'zovanii antennoy s raznostnoi diagrammoi napravlenosti [Error in setting the angular position of a radar object replaced by a two-point model when using an antenna with a difference radiation pattern]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 4 (65), pp. 15–25. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-4-15-25.