



Функция распределения шумов угловых координат распределенной цели, замещаемой двухточечной моделью

А. В. Киселев^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0002-4429-4675, nil_rtu@mail.ru

А. В. Таюров^а, аспирант, orcid.org/0000-0002-5334-2704

^аНовосибирский государственный технический университет, К. Маркса пр., 20, Новосибирск, 630073, РФ

Введение: замещение распределенного объекта двухточечной моделью упрощает имитацию экосигналов от него, но вызывает искажения шумов координат. Проверка модели на достоверность имитации является неотъемлемой частью имитационного моделирования. Одним из критериев адекватности имитации шумов координат служит совпадение функций плотности распределения вероятности для реального объекта и его модели. **Цель:** найти функцию плотности вероятности углового шума распределенного объекта, замещенного двухточечной моделью. **Результаты:** получена оценка плотности распределения вероятности угловых шумов распределенных радиолокационных объектов, замещенных двухточечной моделью, при условии измерения угловых координат антенной, имеющей игольчатую диаграмму направленности. Получены аналитические выражения для ошибок, возникающих при переходе к двухточечной модели, что позволяет оценивать изменения плотности распределения вероятности угловых шумов, обусловленные нелинейностью пеленгационной характеристики антенны. Показано, что эти искажения растут при увеличении углового разноса точек модели и размеров замещаемого объекта. Результаты моделирования продемонстрировали, что с увеличением этих параметров наблюдается увеличение разброса положений кажущегося центра излучения. Кроме того, при положении объекта, смещенном относительно центра двухточечной модели, возникает асимметрия плотности распределения вероятности угловых шумов. Установлена зависимость изменений математического ожидания и ширины функции распределения угловых шумов от формы и ширины диаграммы направленности антенны. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы для оценки достоверности имитации шумов угловых координат распределенных радиолокационных объектов.

Ключевые слова — плотность распределения вероятности, распределенная цель, двухточечная модель, полунатурное моделирование, шумов угловых координат, кажущийся центр излучения.

Для цитирования: Киселев А. В., Таюров А. В. Функция распределения шумов угловых координат распределенной цели, замещаемой двухточечной моделью. *Информационно-управляющие системы*, 2025, № 1, с. 42–50. doi:10.31799/1684-8853-2025-1-42-50, EDN: KCYSEV

For citation: Kiselev A. V., Tayurov A. V. Probability density function of angular coordinates noise for distributed targets replaced by two-point model. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2025, no. 1, pp. 42–50 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2025-1-42-50, EDN: KCYSEV

Введение

Достоинства полунатурного моделирования, заключающегося в том, что реальная радиоэлектронная обстановка замещается искусственной средой, созданной имитаторами сигналов и помех: снижение стоимости разработки, повышение ее скрытности, рост объема и полноты проводимых испытаний и многое другое, — хорошо известны и неоднократно рассматривались в литературе [1–4]. При этом реализация этих преимуществ невозможна без выполнения условия адекватности замещения реальной радиоэлектронной обстановки ее полунатурной моделью [5, 6], имеющего ключевое значение при любом моделировании. Для ряда задач проблема с адекватностью большей частью решена. Вместе с тем остается довольно обширная область, для которой данный аспект требует проработки, а именно имитация радиолокационных отра-

жений от распределенных радиолокационных объектов [7–9] и в первую очередь имитация их распределенности по угловым координатам. Дело в том, что такой объект представим набором точечных отражателей (так называемой геометрической моделью), каждый из которых дает экосигнал, который, суммируясь с экосигналами от других точек, образует искомым экосигнал от объекта в целом [10]. Интерференция отражений от многих точек порождает ряд эффектов, таких как доплеровские биения и случайный характер положения кажущегося центра излучения (КЦИ) [11].

Последний заключается в том, что для распределенного по угловой координате объекта характерно перемещение КЦИ случайным образом [12]. Это явление называется шумами угловых координат (ШК) [13–15]. Они имеют плотность распределения вероятности (ПРВ) [16]

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

где ξ – положение КЦИ распределенного объекта; m – математическое ожидание положения КЦИ; $v > 0$ – параметр, определяющий рассеяние ШК.

Общие соотношения для работы с двухточечной моделью

Использование многоточечных геометрических моделей приводит к сложной многоканальной структуре имитирующего устройства. Поэтому ее заменяют простейшей двухточечной моделью [17]. Однако, как показано в работе [18], такая замена приводит к ошибкам установки углового положения КЦИ:

$$\chi(\xi_{\text{треб}}) = \xi_{\text{изм}} - \xi_{\text{треб}}, \quad (2)$$

где $\xi_{\text{изм}}$ – измеренное значение угла; $\xi_{\text{треб}}$ – требуемое значение угла; $\chi(\xi_{\text{треб}})$ – ошибка, обусловленная замещением объекта двухточечной моделью:

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

Здесь $P = \frac{1}{\delta^2} \frac{r_2}{6r_4}$, 2δ – угол между точками модели; r_2, r_4 – коэффициенты полинома, аппроксимирующего одномерную игольчатую диаграмму направленности (ДН; antenna radiation pattern, ARP) антенны радиолокационной станции [19]:

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

где

$$r_0 = F(\alpha_a); \quad r_1 = \left. \frac{dF(\alpha)}{d\alpha} \right|_{\alpha=\alpha_a}; \quad r_2 = \left. \frac{1}{2} \frac{dF^2(\alpha)}{d\alpha^2} \right|_{\alpha=\alpha_a}; \quad r_3 = \left. \frac{1}{6} \frac{dF^3(\alpha)}{d\alpha^3} \right|_{\alpha=\alpha_a}; \quad r_4 = \left. \frac{1}{24} \frac{dF^4(\alpha)}{d\alpha^4} \right|_{\alpha=\alpha_a};$$

$\alpha_a = 0$ – точка, в окрестности которой производится аппроксимация ДН; j – мнимая единица.

Поскольку при использовании двухточечной модели установка углового положения сопряжена с ошибками, то логично ожидать, что они приведут к ошибкам моделирования, в частности функции распределения ШК распределенного объекта.

Вывод функции распределения угловых шумов двухточечной модели

Найдем ПРВ ШК с учетом ошибок установки углового положения, используя метод обратных функций.

Для упрощения выкладок будем считать, что поляризация приемной антенны совпадает с поляризацией электромагнитной волны от объекта и точек модели.

Установим соответствие между плотностью распределения результатов измерения углового положения объекта $W_{\text{треб}}(\xi_{\text{треб}})$ и его двухточечной модели $W_{\text{изм}}(\xi_{\text{изм}})$.

Соотношение (3) определяет нелинейную связь между $\xi_{\text{треб}}$ и $\xi_{\text{изм}}$. При измерении положения КЦИ для двухточечной модели величина $\xi_{\text{треб}}$ подвергается нелинейному преобразованию $f(\xi_{\text{треб}})$, которое найдем следующим образом. Из (2) получим $\xi_{\text{изм}} = \xi_{\text{треб}} + \chi(\xi_{\text{треб}})$, следовательно, $f(\xi_{\text{треб}}) = \xi_{\text{треб}} + \chi(\xi_{\text{треб}})$.

Для определения $W_{\text{изм}}(\xi_{\text{изм}})$ воспользуемся известным соотношением [20]

$$W_{\text{изм}}(\xi_{\text{изм}}) = W_{\text{треб}}(\xi_{\text{треб}}) \left| \frac{d\xi_{\text{треб}}}{d\xi_{\text{изм}}} \right| = W_{\text{треб}}(f^{-1}(\xi_{\text{изм}})) \left| \frac{d}{d\xi_{\text{изм}}} f^{-1}(\xi_{\text{изм}}) \right|, \quad (4)$$

где $f^{-1}(\xi_{\text{изм}})$ – функция, обратная функции $f(\xi_{\text{треб}})$.

Как показано в [21], $\chi(\xi_{\text{трес}})$ может быть разбита на четыре участка, в пределах которых применимы простейшие аппроксимации (линейным и квадратичным полиномом):

$$\begin{aligned} \chi(\xi) &= \chi_1(\xi) + \chi_2(\xi) + \chi_3(\xi) + \chi_4(\xi), \\ \chi_1(\xi) &= a_0 + a_1\xi \text{ при } \xi \leq -\xi_{\text{ТР}}, \text{ иначе } \chi_1(\xi) = 0; \\ \chi_2(\xi) &= b_0 + b_1\xi + b_2\xi^2 \text{ при } -\xi_{\text{ТР}} < \xi \leq 0, \\ &\text{иначе } \chi_2(\xi) = 0; \\ \chi_3(\xi) &= -b_0 + b_1\xi - b_2\xi^2 \text{ при } 0 < \xi < \xi_{\text{ТР}}, \\ &\text{иначе } \chi_3(\xi) = 0; \\ \chi_4(\xi) &= -a_0 + a_1\xi \text{ при } \xi \geq \xi_{\text{ТР}}, \text{ иначе } \chi_4(\xi) = 0, \end{aligned}$$

где $\chi_1(\xi) - \chi_4(\xi)$ – функции ошибки установки углового положения КЦИ на участках 1–4 соответственно; a_0, a_1, b_0, b_1, b_2 – коэффициенты аппроксимации; $-\xi_{\text{ТР}}, \xi_{\text{ТР}}$ – точки перехода (transition points, TP) от линейного к квадратичному участку и наоборот.

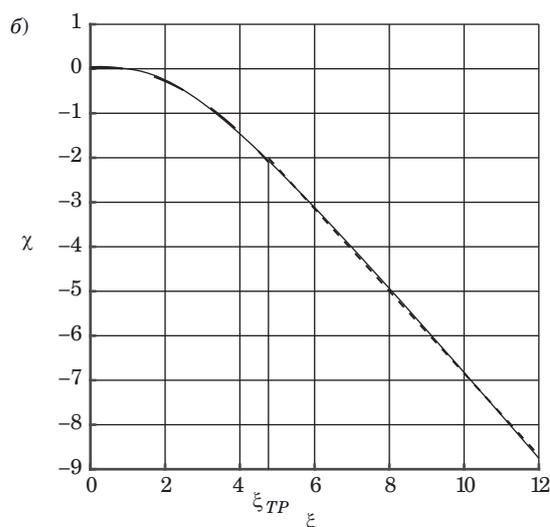
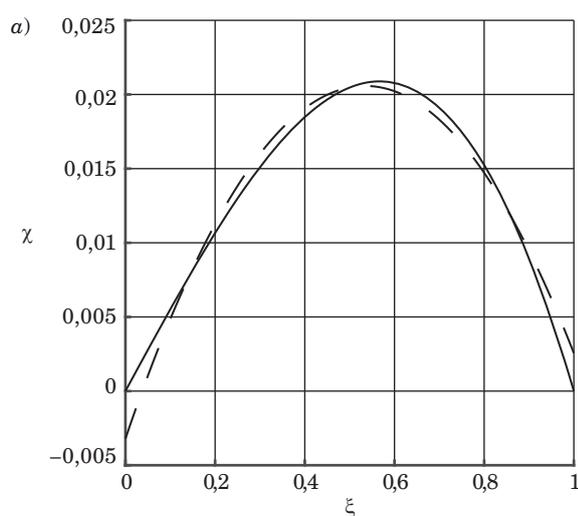
Коэффициенты аппроксимации и положение точек перехода от линейных к квадратичным участкам зависят от ДН сканирующей антенны и базы матрицы.

Результаты их поиска представлены в работе [21], частично в табл. 1 и на рис. 1, а и б. Они получены для антенн, ДН которых (точнее, их главные лепестки) дают наименьшие (ДН вида коси-

■ **Таблица 1.** Коэффициенты аппроксимации ошибки пеленга и максимальные относительные значения ошибок аппроксимации

■ **Table 1.** Approximation coefficients of bearing error for the ARP and the maximum relative values of approximation errors

Параметр	Коэффициенты для ДН вида			
	косинус		экспонента Гаусса	
δ	$0,1\alpha_{0,5}$	$0,5\alpha_{0,5}$	$0,1\alpha_{0,5}$	$0,5\alpha_{0,5}$
a_0	-10,9725	-2,3981	-7,3663	-1,4928
a_1	-0,90563	-0,92415	-0,96413	-0,96285
Макс.	-0,069189	-0,0069092	-0,005086	-0,063941
$\xi_{\text{ТР}}$	19,5	4,764	15,72	2,544
b_0	-0,013755	-0,033863	-0,14653	-0,029793
b_1	0,059367	0,054836	-0,034127	0,1857
b_2	0,022126	0,10548	0,031548	0,24022
Макс.	-0,012729	-0,027933	-0,030756	-0,058507



■ **Рис. 1.** Пример аппроксимации функции ошибки (3) для $\delta=0,5\alpha_{0,5}$, ДН косинус: а – в пределах модели квадратичным полиномом; б – на участках 3 и 4

■ **Fig. 1.** An example of approximation of the error function (3) for $\delta=0,5\alpha_{0,5}$, ARP cosine: а – within the model by a quadratic polynomial; б – in sections 3 and 4

нус: $F(\alpha) = \cos(1,5711\alpha/2\alpha_{0,5})$) и наибольшие (ДН вида экспонента Гаусса: $F(\alpha) = \exp(-(1,178\alpha/2\alpha_{0,5})^2)$) значения ошибок. Аргументы функций, определяющих ДН, подобраны так, чтобы обеспечить одинаковую ширину ДН по уровню половинной мощности.

Кривая (рис. 1, а), полученная по (3), показана сплошной линией, аппроксимирующая кривая, полученная по критерию минимума максимальной ошибки, показана штриховой линией. Сплошная кривая (рис. 1, б) получена по (3), две аппроксимирующие ее кривые (штриховая $\chi_3(\xi)$ и пунктирная $\chi_4(\xi)$) соединились в точке перехода $\xi_{ТР}$.

Численные оценки, представленные в табл. 1, показывают, что относительная максимальная ошибка аппроксимации составляет для ДН вида косинус менее 7 %, а для ДН вида экспонента Гаусса – менее 6,4 %.

Функция ошибки разбивается на два квадратичных и два линейных участка, на которых описывается простыми соотношениями. Рассмотрим ПРВ на этих участках.

1. Для линейного участка $\xi \leq -\xi_{ТР}$.

Найдем функцию, обратную функции $f(\xi_{треб})$:

$$\chi_1(\xi_{треб}) = \xi_{изм} - \xi_{треб} = a_0 + a_1\xi_{треб}, \quad \xi_{изм} = a_0 + a_1\xi_{треб} + \xi_{треб};$$

$$\xi_{изм} = a_0 + \xi_{треб}(1 + a_1); \quad \xi_{треб} = \frac{\xi_{изм} - a_0}{1 + a_1}.$$

Таким образом, обратная функция

$$f^{-1}(\xi_{изм}) = \frac{\xi_{изм} - a_0}{1 + a_1}.$$

Найдем производную обратной функции:

$$\frac{d}{d\xi_{изм}} f^{-1}(\xi_{изм}) = \frac{1}{1 + a_1}.$$

Выразим искомую плотность вероятности через исходную (1), используя (4):

$$W_{изм 1}(\xi_{изм}) = \frac{v}{2 \left(1 + v^2 \left(\frac{\xi_{изм} - a_0}{1 + a_1} - m \right)^2 \right)^{3/2}} \frac{1}{|1 + a_1|}.$$

Для второго линейного участка ($\xi \geq \xi_{ТР}$) имеем

$$\chi_4(\xi_{треб}) = \xi_{изм} - \xi_{треб} = -a_0 + a_1\xi_{треб};$$

$$f^{-1}(\xi_{изм}) = \frac{\xi_{изм} + a_0}{1 + a_1};$$

$$W_{изм 4}(\xi_{изм}) = \frac{v}{2 \left(1 + v^2 \left(\frac{\xi_{изм} + a_0}{1 + a_1} - m \right)^2 \right)^{3/2}} \frac{1}{|1 + a_1|}.$$

2. Для квадратичного участка $-\xi_{ТР} < \xi \leq 0$:

$$\xi_{изм} = b_0 + b_1\xi_{треб} + b_2\xi_{треб}^2 + \xi_{треб};$$

$$\xi_{изм} = b_0 + \xi_{треб}(1 + b_1) + b_2\xi_{треб}^2;$$

$$\xi_{треб 1,2} = -\frac{b_1 + 1 \pm \sqrt{b_1^2 - 4b_0b_2 + 4b_2\xi_{изм} + 2b_1 + 1}}{2b_2}.$$

Таким образом, обратная функция

$$f_{1,2}^{-1}(\xi_{\text{изм}}) = -\frac{b_1 + 1 \pm \sqrt{b_1^2 - 4b_0b_2 + 4b_2\xi_{\text{изм}} + 2b_1 + 1}}{2b_2}.$$

Найдем производную от обратной функции:

$$\frac{d}{d\xi_{\text{изм}}} f_{1,2}^{-1}(\xi_{\text{изм}}) = \pm \frac{1}{\sqrt{b_1^2 - 4b_0b_2 + 4b_2\xi_{\text{изм}} + 2b_1 + 1}}.$$

Выразим искомую плотность вероятности, используя (4):

$$W_{\text{изм } 2}(\xi_{\text{изм}}) = \frac{v}{2 \left(1 + v^2 \left(-\frac{b_1 + 1 + \sqrt{b_1^2 - 4b_0b_2 + 4b_2\xi_{\text{изм}} + 2b_1 + 1}}{2b_2} - m \right)^2 \right)^{3/2}} \times$$

$$\times \left| \frac{1}{\sqrt{b_1^2 - 4b_0b_2 + 4b_2\xi_{\text{изм}} + 2b_1 + 1}} \right| + \frac{v}{2 \left(1 + v^2 \left(-\frac{b_1 + 1 - \sqrt{b_1^2 - 4b_0b_2 + 4b_2\xi_{\text{изм}} + 2b_1 + 1}}{2b_2} - m \right)^2 \right)^{3/2}} \times$$

$$\times \left| \frac{1}{\sqrt{b_1^2 - 4b_0b_2 + 4b_2\xi_{\text{изм}} + 2b_1 + 1}} \right|.$$

Для второго квадратичного участка ($0 < \xi < \xi_{\text{ГР}}$) имеем

$$\xi_{\text{изм}} = -b_0 + b_1\xi_{\text{треб}} - b_2\xi_{\text{треб}}^2 + \xi_{\text{треб}};$$

$$\xi_{\text{изм}} = -b_0 + \xi_{\text{треб}}(1 + b_1) - b_2\xi_{\text{треб}}^2;$$

$$\xi_{\text{треб } 1,2} = f_{1,2}^{-1}(\xi_{\text{изм}}) = \frac{b_1 + 1 \pm \sqrt{b_1^2 \pm 2b_1 - 4b_0b_2 - 4b_2\xi_{\text{изм}} + 1}}{2b_2};$$

$$\frac{d}{d\xi_{\text{изм}}} f_{1,2}^{-1}(\xi_{\text{изм}}) = -\frac{1}{\sqrt{b_1^2 \pm 2b_1 - 4b_0b_2 - 4b_2\xi_{\text{изм}} + 1}}.$$

Найдем искомую плотность вероятности:

$$W_{\text{изм } 3}(\xi_{\text{изм}}) = \frac{v}{2 \left(1 + v^2 \left(\frac{b_1 + 1 + \sqrt{b_1^2 + 2b_1 - 4b_0b_2 - 4b_2\xi_{\text{изм}} + 1}}{2b_2} - m \right)^2 \right)^{3/2}} \times$$

$$\times \left| \frac{1}{\sqrt{b_1^2 + 2b_1 - 4b_0b_2 - 4b_2\xi_{\text{изм}} + 1}} \right| + \frac{v}{2 \left(1 + v^2 \left(\frac{b_1 + 1 - \sqrt{b_1^2 - 2b_1 - 4b_0b_2 - 4b_2\xi_{\text{изм}} + 1}}{2b_2} - m \right)^2 \right)^{3/2}} \times$$

$$\times \left| \frac{1}{\sqrt{b_1^2 - 2b_1 - 4b_0b_2 - 4b_2\xi_{изм} + 1}} \right|.$$

Сравнительный анализ распределений угловых шумов объекта и двухточечной модели

Результаты расчетов по полученным формулам представлены на рис. 2, а-г.

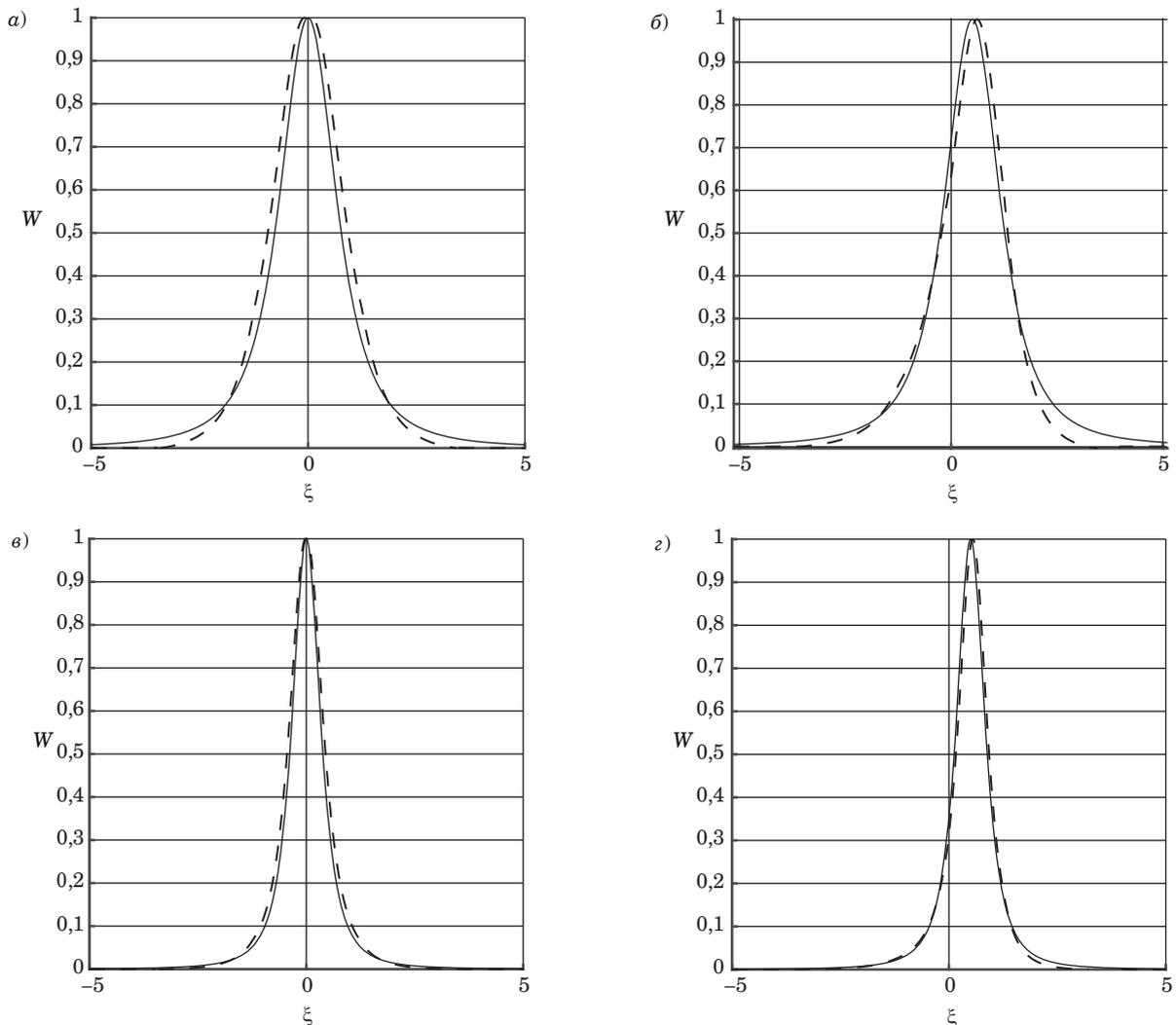
Плотность распределения вероятности ШК объекта выведена сплошной линией, ПРВ двухточечной модели – штриховой. Угловой разнос излучателей двухточечной модели равен половине ширины ДН ($\delta = 0,5\alpha_{0,5}$). Рисунки получены для ДН вида косинус.

Из них видно, что при $m = 0$ (рис. 2, а) положения максимумов $W_{\text{треб}}(\xi_{\text{треб}})$ и $W_{\text{изм}}(\xi_{\text{изм}})$ совпадают, что означает отсутствие смещения положения объекта имитации. Однако вблизи математического ожидания наблюдается расширение ПРВ – увеличение разброса положений КЦИ.

Проведем эксперимент для $v = 2$ (рис. 2, в и г):

При m в интервале между точками модели, но не в ее центре (рис. 2, б и г), появляется смещение положения объекта (смещение ПРВ). При этом ошибка установки углового положения приводит к тому, что:

- возникает ошибка в математическом ожидании ШК;
- $W_{\text{изм}}(\xi_{\text{изм}})$ становится несимметричной;
- изменяется размах ШК.



■ **Рис. 2.** Нормированные ПРВ объекта и двухточечной модели для $v = 1, m = 0$ (а); $v = 1, m = 0,5$ (б); $v = 2, m = 0$ (в); $v = 2, m = 0,5$ (г)
 ■ **Fig. 2.** Normalized probability density function object and two-point model for $v = 1, m = 0$ (а); $v = 1, m = 0,5$ (б); $v = 2, m = 0$ (в); $v = 2, m = 0,5$ (г)

■ **Таблица 2.** Статистические характеристики ПРВ объекта и двухточечной модели

■ **Table 2.** Statistical characteristics of the probability density function of the object and the two-point model

Параметры	Тип	m	γ_1
$v = 1, m = 0$	Объект	0	0
	Модель	0	0
$v = 1, m = 0,5$	Объект	0,5	0
	Модель	0,40505	-0,67049
$v = 2, m = 0$	Объект	0	0
	Модель	0	0
$v = 2, m = 0,5$	Объект	0,5	0
	Модель	0,48057	-0,94519

Значения математического ожидания m и коэффициента асимметрии γ_1 [22], определенные для функций ПРВ ШК объекта и модели, приведены в табл. 2.

Заключение

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Найдено выражение для расчета плотности вероятности распределения угловых шумов двухточечной геометрической модели распределенного радиолокационного объекта.

2. Показано, что ошибки установки углового положения, обусловленные замещением распределенных объектов их двухточечными моделями, приводят к искажениям функции распределения имитируемых шумов угловых координат, а также погрешностям установки их параметров.

3. Эти погрешности в первую очередь проявляются в виде изменения математического ожидания и ширины функции распределения углового шума.

4. При этом, судя по результатам расчетов, вид функции распределения изменяется незначительно.

5. Изменения математического ожидания и ширины плотности вероятности распределения угловых шумов зависят от ДН радиолокационной станции, относительных размеров замещаемого объекта, разнеса излучателей модели и ряда других факторов.

6. Увеличение разнеса точек двухточечной модели и угловых размеров объекта приводит к росту ошибок задания математического ожидания, а также уменьшению рассеяния шумов угловых координат.

7. Поэтому для снижения названных ошибок следует уменьшать разнос точек, а также относительные угловые размеры замещаемого объекта.

8. В целом полученные результаты позволяют оценивать достоверность имитации шумов угловых координат распределенных радиолокационных объектов.

Литература

- Bokov A., Slizkoy V.** Generation of radar ground clutter echoes with Jakes' Doppler spectrum on FPGA. *Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*, Yekaterinburg, 19–21 September, 2022, pp. 136–140. doi:10.1109/USBEREIT56278.2022.9923348
- Durnakov A. A., Bokov A. S., Slizkoy V. K.** Simulation of a radar target in the presence of a specular reflection from a water surface. *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, Divnomorskoe, 28 June 2021–02 July, 2021, pp. 401–404. doi:10.1109/RSEMW52378.2021.9494044
- Gorbatenko N. N., Nesterov V. Yu., Chikov N. I., Pomysov A. S.** Software development simulation model of the radar environment with verification based on full-scale experiment. *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, Divnomorskoe, 26–30 June, 2023, pp. 260–263. doi:10.1109/RSEMW58451.2023.10202080
- Wang Z., Xi X., Liao G., Lan L., Chen H.** Refined modeling and simulation method of raw signal returns for space-based radar. *IEEE 3rd International*

- Conference on Power, Electronics and Computer Applications (ICPECA)*, Shenyang, China, 29–31 January, 2023, pp. 214–219. doi:10.1109/ICPECA56706.2023.10076012
- Ergezer H., Keskin M. F., Gunay O.** Hardware-in-the-loop radar test simulator. *4th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH)*, Vienna, Austria, 28–30 August, 2014. doi:10.5220/0005034506660673
- 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, no. 28 (5), pp. 1476–1484. doi:10.1016/j.cja.2015.07.006
- Taylor J., Hoare E., Gashinova M., Cherniakov M.** Experimental study of target signatures in reverse forward scatter radar with spatially distributed reflections. *International Radar Symposium (IRS)*, Wroclaw, Poland, 2–4 July, 2024, pp. 384–388.
- Bokov A., Slizkoy V.** Generation of radar ground clutter echoes with Jakes' Doppler spectrum on FPGA. *Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*, Yekaterinburg, 19–21 September,

- 2022, pp. 136–140. doi:10.1109/USBREIT56278.2022.9923348
9. **Stepanov M. A.** Simulation of reflections from surface-distributed objects on example of fragment of underlying surface. *Issues of Radio Electronics*, 2019, no. 4, pp. 22–26. doi:10.21778/2218-5453-2019-4-22-26
 10. **Gu D., Gao P., Xie Z., Gao W., Du Y., Xu X.** A fast generation algorithm of radar images for ships on time-evolving sea surface. *2nd China International SAR Symposium (CISS)*, Shanghai, China, 3–5 November, 2021, pp. 1–5. doi:10.23919/CISS51089.2021.9652361
 11. **Rao B., Gu Z., Nie Y.** Deception approach to track-to-track radar fusion using noncoherent dual-source jamming. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 50843–50858. doi:10.1109/ACCESS.2020.2980010
 12. **Zhang Y., Shen M., Wu D., Zhu D., Zhang Y.** Reduced complexity mutiple-target angle-Doppler-range estimation using space-time cascaded monopulse processing. *Digital Signal Processing*, 2023, vol. 143, ID 104239. doi:10.1016/j.dsp.2023.104239
 13. **Li Y., Wang C., Dong S., Shen J., Wang H.** Fast estimated calculation of wideband radar angular glint using single frequency method. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 212541–212547. doi:10.1109/ACCESS.2020.3040436
 14. **Guo K. Y., Xiao G. L., Zhai Y., Sheng X. Q.** Angular glint error simulation using attributed scattering center models. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 35194–35205. doi:10.1109/ACCESS.2018.2846538
 15. **Selcuk B.** *Target Glint Phenomenon Analysis and of Glint Reduction Techniques*. PhD thesis, Sept. 2012. 87 p. <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12614679/index.pdf> (дата обращения: 21.05.2023).
 16. **Островитянов Р. В., Басалов Ф. А.** *Статистическая теория радиолокации протяженных целей*. М., Радио и связь, 1982. 232 с.
 17. **Киселев А. В., Степанов М. А.** Замещение сложного радиолокационного объекта двухточечной моделью. *Известия РАН. Теория и системы управления*, 2019, т. 58, № 4, с. 99–105. doi:10.1134/S0002338819040061, EDN: UESJPN
 18. **Tayurov A. V., Kiselev A. V.** Errors in setting the angular position in matrix simulators due to the nonlinearity of the direction finding characteristics of the antenna. *16 International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2023)*, Novosibirsk, 10–12 November, 2023, pp. 570–573. doi:10.1109/APEIE59731.2023.10347847
 19. **Вендик О. Г., Парнес М. Д., Бахрах Л. Д.** *Антенны с электрическим сканированием. Введение в теорию*. М., Сов. радио, 2001. 252 с.
 20. **Wood S. N.** *Core Statistics*. New York, Cambridge University Press, 2015. 270 p. doi:<https://doi.org/10.1017/CBO9781107741973>
 21. **Киселев А. В., Таюров А. В.** Соотношения для оценки ошибок установки углового положения в матричных имитаторах радиоэлектронной обстановки. *Доклады АН ВШ РФ*, 2024, № 2 (63), с. 43–53. doi:10.17212/1727-2769-2024-2-43-53
 22. **Walck C.** *Handbook on Statistical Distributions for Experimentalists*. Stockholm, University of Stockholm, 2007. 411 p.

UDC 621.396.96

doi:10.31799/1684-8853-2025-1-42-50

EDN: KCYSEV

Probability density function of angular coordinates noise for distributed targets replaced by two-point modelA. V. Kiselev^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-4429-4675, nil_rtu@mail.ruA. V. Tayurov^a, Post-Graduate Student, orcid.org/0000-0002-5334-2704^aNovosibirsk State Technical University, 20, K. Marksa Pr., 630073, Novosibirsk, Russian Federation

Introduction: Replacing a distributed object with a two-point model simplifies the simulation of echo signals from it, but causes distortion of coordinate noise. Checking the model for simulation validity is an integral part of simulation modeling. One of the criteria for the adequacy of simulating coordinate noise is the coincidence of probability distribution density functions for a real object and its model. **Purpose:** To find the probability density function of angular noise of a distributed object replaced by a two-point model. **Results:** We have obtained an estimate of the probability density of angular noise distribution of distributed radar objects replaced by a two-point model, provided that the angular coordinates have been measured by an antenna having a needle pattern. In addition, we obtain analytical expressions for errors that occur during the transition to a two-point model, which makes it possible to estimate changes in the probability density of angular noise due to the nonlinearity of the direction-finding characteristics of the antenna. The research shows that these distortions grow with an increase in the angular spacing of the model points and the size of the object being replaced. The simulation results show that with an increase in these parameters, an increase in the spread of the positions of the apparent radiation center is observed. Furthermore, when the object's position is shifted relative to the center of the two-point model, an asymmetry in the probability distribution density of angular noise occurs. We establish the dependence of changes in the mathematical expectation and the width of the angular noise distribution function on the shape and width of the antenna pattern. **Practical relevance:** the results obtained can be used to assess the reliability of noise simulation of angular coordinates of distributed radar objects.

Keywords – probability density function, distributed targets, two-point model, semi-natural modeling, angular coordinate noise, glint, apparent radiating center.

For citation: Kiselev A. V., Tayurov A. V. Probability density function of angular coordinates noise for distributed targets replaced by two-point model. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2025, no. 1, pp. 42–50 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2025-1-42-50, EDN: KCYSEV

References

1. Bokov A., Slizkoy V. Generation of radar ground clutter echoes with Jakes' Doppler spectrum on FPGA. *Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*, Yekaterinburg, 2022, pp. 136–140. doi:10.1109/USBEREIT56278.2022.9923348
2. Durnakov A. A., Bokov A. S., Slizkoy V. K. Simulation of a radar target in the presence of a specular reflection from a water surface. *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, Divnomorskoe, 2021, pp. 401–404. doi:10.1109/RSEMW52378.2021.9494044
3. Gorbatenko N. N., Nesterov V. Yu., Chikov N. I., Pomysov A. S. Software development simulation model of the radar environment with verification based on full-scale experiment. *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, Divnomorskoe, 2023, pp. 260–263. doi:10.1109/RSEMW58451.2023.10202080
4. Wang Z., Xi X., Liao G., Lan L., Chen H. Refined modeling and simulation method of raw signal returns for space-based radar. *IEEE 3rd International Conference on Power, Electronics and Computer Applications (ICPECA)*, Shenyang, China, 2023, pp. 214–219. doi:10.1109/ICPECA56706.2023.10076012
5. Ergezer H., Keskin M. F., Gunay O. Hardware-in-the-loop radar test simulator. *4th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH)*, Vienna, Austria, 2014. doi:10.5220/0005034506660673
6. 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, no. 28 (5), pp. 1476–1484. doi:10.1016/j.cja.2015.07.006
7. Taylor J., Hoare E., Gashinova M., Cherniakov M. Experimental study of target signatures in reverse forward scatter radar with spatially distributed reflections. *International Radar Symposium (IRS)*, 2024, pp. 384–388.
8. Bokov A., Slizkoy V. Generation of radar ground clutter echoes with Jakes' Doppler spectrum on FPGA. *Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*, Yekaterinburg, 2022, pp. 136–140. doi:10.1109/USBEREIT56278.2022.9923348
9. Stepanov M. A. Simulation of reflections from surface-distributed objects on example of fragment of underlying surface. *Issues of Radio Electronics*, 2019, no. 4, pp. 22–26. doi:10.21778/2218-5453-2019-4-22-26
10. Gu D., Gao P., Xie Z., Gao W., Du Y., Xu X. A fast generation algorithm of radar images for ships on time-evolving sea surface. *2nd China International SAR Symposium (CISS)*, Shanghai, China, 2021, pp. 1–5. doi:10.23919/CISS51089.2021.9652361
11. Rao B., Gu Z., Nie Y. Deception approach to track-to-track radar fusion using noncoherent dual-source jamming. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 50843–50858. doi:10.1109/ACCESS.2020.2980010
12. Zhang Y., Shen M., Wu D., Zhu D., Zhang Y. Reduced complexity multiple-target angle-Doppler-range estimation using space-time cascaded monopulse processing. *Digital Signal Processing*, 2023, vol. 143, ID 104239. doi:10.1016/j.dsp.2023.104239
13. Li Y., Wang C., Dong S., Shen J., Wang H. Fast estimated calculation of wideband radar angular glint using single frequency method. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 212541–212547. doi:10.1109/ACCESS.2020.3040436
14. Guo K. Y., Xiao G. L., Zhai Y., Sheng X. Q. Angular glint error simulation using attributed scattering center models. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 35194–35205. doi:10.1109/ACCESS.2018.2846538
15. Selcuk B. *Target Glint Phenomenon Analysis and of Glint Reduction Techniques*. PhD thesis, Sept. 2012, 87 p. Available at: <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12614679/index.pdf> (accessed 21 May 2023).
16. Ostrovityanov R. V., Basalov F. A. *Statisticheskaya teoriya radiolokacii protyazhennyh celej* [Statistical theory of radar of extended targets]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1982. 232 p. (In Russian).
17. Kiselev A. V., Stepanov M. A. Replacement of a complex radar object by a two-point model. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2019, vol. 58, no. 4, pp. 595–600. doi:10.1134/S0002338819040061, EDN: UESJPN
18. Tayurov A. V., Kiselev A. V. Errors in setting the angular position in matrix simulators due to the nonlinearity of the direction finding characteristics of the antenna. *16 International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2023)*, Novosibirsk, 2023, pp. 570–573. doi:10.1109/APEIE59731.2023.10347847
19. Vendik O. G., Parnes M. D., Bakhrah L. D. *Antennы s elektricheskimi skanirvaniem. Vvedenie v teoriyu* [Antennas with electric scanning. Introduction to theory]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 2001. 252 p. (In Russian).
20. Wood S. N. *Core Statistics*. New York, Cambridge University Press, 2015. 270 p. doi:<https://doi.org/10.1017/CBO9781107741973>
21. Kiselev A. V., Tayurov A. V. Ratios for estimating errors in the installation of angular position in matrix simulators of an electronic environment. *Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2024, no. 2 (63), pp. 43–53 (In Russian). doi:10.17212/1727-2769-2024-2-43-53
22. Walck C. *Handbook on Statistical Distributions for Experimentalists*. Stockholm, University of Stockholm Publ., 2007. 411 p.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая Scopus и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, что снижает рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста, есть возможность провести регистрацию на 12 языках, включая русский (чтобы выбрать язык, кликните на зеленое поле сверху справа на стартовой странице): <https://orcid.org>