

СТАТИСТИЧЕСКАЯ
РАДИОФИЗИКА

УДК 621.396.01

СИНТЕЗ ЧЕТЫРЕХТОЧЕЧНОЙ МОДЕЛИ САМОЛЕТА

© 2024 г. М. А. Степанов*, А. В. Киселев, В. В. Артюшенко

*Новосибирский государственный технический университет,
просп. Карла Маркса, 20, Новосибирск, 630073 Российская Федерация***E-mail: m.stepanov@corp.nstu.ru*

Поступила в редакцию 22.12.2022 г.

После доработки 16.05.2023 г.

Принята к публикации 13.11.2023 г.

Рассмотрено моделирование эхосигналов от распределенных радиолокационных объектов с учетом шумов их угловых координат. Приведены соотношения, позволяющие осуществить переход от многоточечной модели произвольного объекта, содержащей десятки, сотни и даже тысячи излучающих точек, к модели, составленной из четырех излучающих точек, расположенных в вершинах квадрата. В качестве примера синтезирована модель самолета, содержащая всего четыре точки. Она получена на основе многоточечной модели, составленной из 56 точек. Методами численного моделирования показано, что угловые шумы, формируемые многоточечной и четырехточечной моделями самолета, имеют совпадающие корреляционные функции и близкие параметры плотности распределения вероятности шумов угловых координат. Полученный результат также подтвержден методами полунатурного моделирования с использованием матричного имитатора.

Ключевые слова: моделирование эхо-сигналов, многоточечная модель, плотность распределения вероятности, кажущийся центр излучения, корреляционные функции, матричный имитатор

DOI: 10.31857/S0033849424030045, EDN: JVHGFХ

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время при моделировании радиолокационных эхосигналов широко используют геометрические модели отражающих объектов [1–4]. Они представляют собой точки, расположенные в некоторой области пространства. Конфигурация и количество точек, а также параметры отражаемых от них сигналов определяются условиями адекватности модели замещаемому объекту: в частности, адекватностью воспроизведения характеристик угловых шумов, обусловленных тем, что нормаль к фазовому фронту электромагнитной волны, отраженной от большого числа разнесенных по угловым координатам точек, формирует направление на эквивалентный центр отражения, блуждающий по поверхности объекта и даже выходящий за его пределы [5].

С учетом этих случайных блужданий плотность распределения вероятностей (ПРВ) для координат “азимут” и “угол места” объекта имеет вид [5]

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

где ξ — обобщенная угловая координата (азимут или угол места); m — математическое ожидание углового положения; μ — параметр, характеризующий ширину распределения. Параметры m и μ характеризуют угловое положение и угловой размер наблюдаемого объекта. Чем больше величина параметра μ , тем меньше угловой размер объекта. Величины m и μ определяются распределением отражающих точек по объекту. Соотношения для их расчета по заданному распределению отражающих точек приведены в [5].

Как правило, количество точек модели достаточно велико. Это десятки, сотни, а в некоторых случаях тысячи точек. При имитационном моделировании точки модели должны замещаться излучающими антеннами [6]. Учитывая большое количество точек, это

приводит к необходимости использования сложных и дорогих антенных систем, а также устройств формирования подводимых к ним сигналов.

Поэтому актуален переход к модели, содержащей существенно меньшее количество точек — переход к малоточечной геометрической модели объекта. Такие модели существуют и известны [3, 7]. Пути их синтеза теоретически обоснованы, в частности, в [7]. Они заключаются в следующем.

Синтез осуществляется в два этапа. На первом строится многоточечная модель замещаемого объекта. Затем количество точек сокращается до четырех за счет ввода дополнительного условия — условия статистической зависимости сигналов, отражаемых точками.

Рассматривают три вида малоточечных моделей, отличающихся величиной статистической связи между сигналами, подводимыми к излучающим точкам [7]: когерентные, некогерентные и частично когерентные.

К точкам когерентных моделей подводятся сигналы с коэффициентом взаимной корреляции, по модулю равным единице. Параметр μ ПРВ угловых шумов такой модели велик, что соответствует отражениям от точечного объекта, угловое положение которого определяется отношением амплитуд и разностью фаз сигналов, подводимых к точкам модели.

К точкам некогерентной модели подводят некоррелированные нормальные случайные процессы. В силу этого положение кажущегося центра излучения (КЦИ) в разные моменты времени тоже является случайным. Управление параметрами ПРВ обеспечивается путем регулирования отношения дисперсий излучаемых случайных процессов.

К точкам частично когерентной модели подводятся коррелированные случайные процессы с коэффициентом взаимной корреляции, лежащем в диапазоне $r \in (-1; 0) \cup (0; 1)$. Управление параметрами угловых шумов осуществляется путем изменения дисперсий, подводимых к точкам модели случайных процессов и значений коэффициента их взаимной корреляции.

Нетрудно заметить, что при стремлении модуля коэффициента взаимной корреляции $|r| \rightarrow 1$ частично когерентная модель переходит в полностью когерентную. При стремлении значения коэффициента взаимной корреляции $r \rightarrow 0$ частично когерентная модель переходит в некогерентную.

Таким образом, частично когерентная модель может рассматриваться как общий случай и представляет наибольший интерес.

Вместе с тем представленные в [7] материалы лишь теоретически обосновывают возможность синтеза малоточечных моделей радиолокационных объектов. Их применение для синтеза малоточечных моделей типовых радиолокационных объектов и результаты экспериментальной апробации отсутствуют в литературе.

Цель данной работы — синтезировать четырехточечную геометрическую модель типового радиолокационного объекта (самолета) и провести ее экспериментальную апробацию.

В качестве критерия адекватности моделирования угловых шумов будем использовать обычно применяемые для этих целей их корреляционную функцию, а также ПРВ [4–7].

2. ИСХОДНАЯ МНОГОТОЧЕЧНАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим синтез модели на примере абстрактного самолета, составленного из простейших компонентов (рис. 1) [8–10].

Распределение отражающих точек по его поверхности представлено на рис. 2 [8, 9]. Общее количество точек (обозначим его N) составляет 56: по 15 точек для отражающих элементов каждого из крыльев, 12 — для фюзеляжа, 14 — для хвостового оперения. Их количество и положение хорошо согласуются с данными, приводимыми в литературе. Например, в [11] предлагается использовать 54 точки для самолета SNB, в [12, 13] — 42 для самолета B-2.

Координаты точек (в метрах) приведены в табл. 1. Синтезированная модель и направления осей системы координат изображены на рис. 3. Интенсивность отражений от точек полагается одинаковой.

Каждая из точек многоточечной модели формирует электромагнитную волну со случайной начальной фазой, равномерно распределенной в интервале $[0; 2\pi]$, и доплеровской частотой, определяемой проекцией векторов скорости сближения точек замещаемого объекта и радиолокационной станции (РЛС) на направление визирования точки [14]:

$$fd_i = \frac{v_x x_i + v_y y_i + v_z z_i}{D_i} \frac{2}{\lambda},$$

где v_x , v_y и v_z — проекции скорости сближения объекта и РЛС на координатные оси; $(x_i; y_i; z_i)$ — декартовы координаты i -й блестящей точки объ-

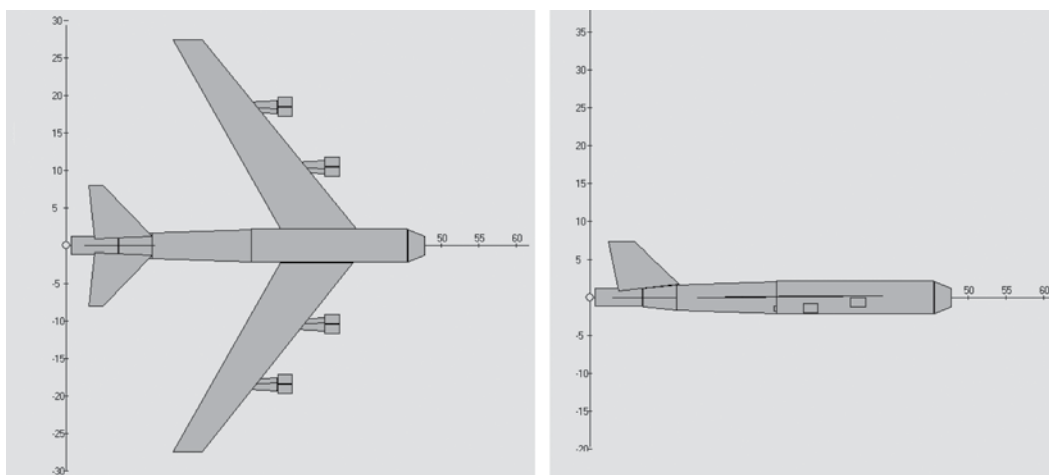


Рис. 1. Модель самолета, составленная из простейших компонентов [8, 9].

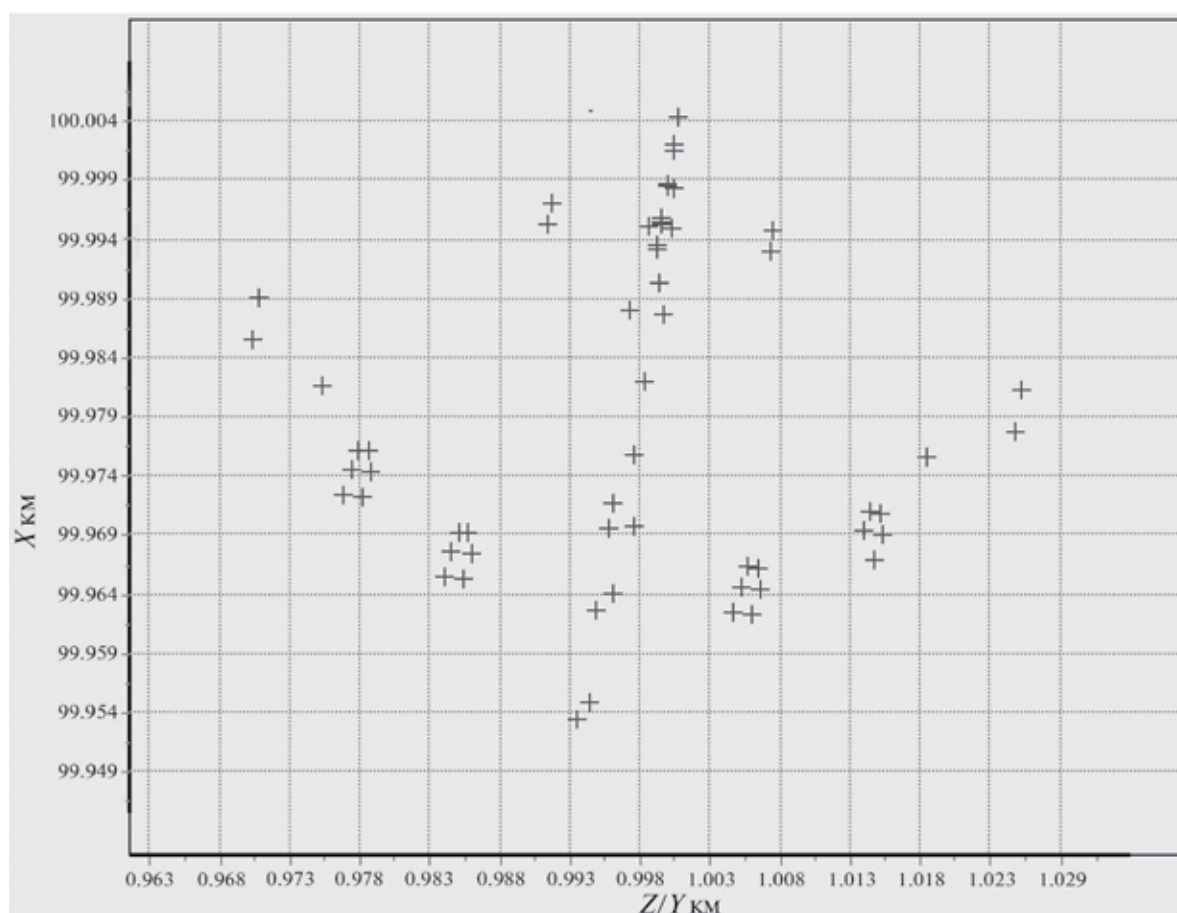


Рис. 2. Распределение отражающих элементов самолета [8, 9].

екта в связанной системе координат с началом в точке размещения фазового центра антенны РЛС; D_i — дальность от РЛС до i -й блестящей точки объекта; λ — длина волны зондирующего сигнала.

3. СИНТЕЗ МАЛОТОЧЕЧНОЙ МОДЕЛИ

Руководствуясь результатами [7], синтезируем четырехточечную модель. Ее излучатели $1...4$ располагаются в вершинах квадрата (рис. 4).

Таблица 1. Координаты точек модели (метры)

Точка	X	Y	Z	Точка	X	Y	Z	Точка	X	Y	Z	Точка	X	Y	Z
1	0	0	0	15	7	7	0	29	17	0	26	43	22	0	-17
2	3	0	0	16	14	0	1,5	30	17	0	-26	44	24	0	-17
3	6	0	1	17	14	0	-1,5	31	19	0	22	45	25	0	12
4	6	0	-1	18	20	0	0	32	19	0	-22	46	27	0	12
5	9	0	1	19	25	0	0	33	20	0	20	47	29	0	12
6	9	0	-1	20	30	0	2	34	20	0	-20	48	25	0	9
7	12	0	1	21	30	0	-2	35	22	0	20	49	27	0	9
8	12	0	-1	22	32	0	0	36	24	0	20	50	29	0	9
9	13	0	0	23	38	0	2	37	20	0	17	51	25	0	-12
10	5	0	7	24	38	0	-2	38	22	0	17	52	27	0	-12
11	7	0	7	25	47	0	1	39	24	0	17	53	29	0	-12
12	5	0	-7	26	47	0	-1	40	22	0	-20	54	25	0	-9
13	7	0	-7	27	15	0	26	41	24	0	-20	55	27	0	-9
14	5	7	0	28	15	0	-26	42	20	0	-17	56	29	0	-9

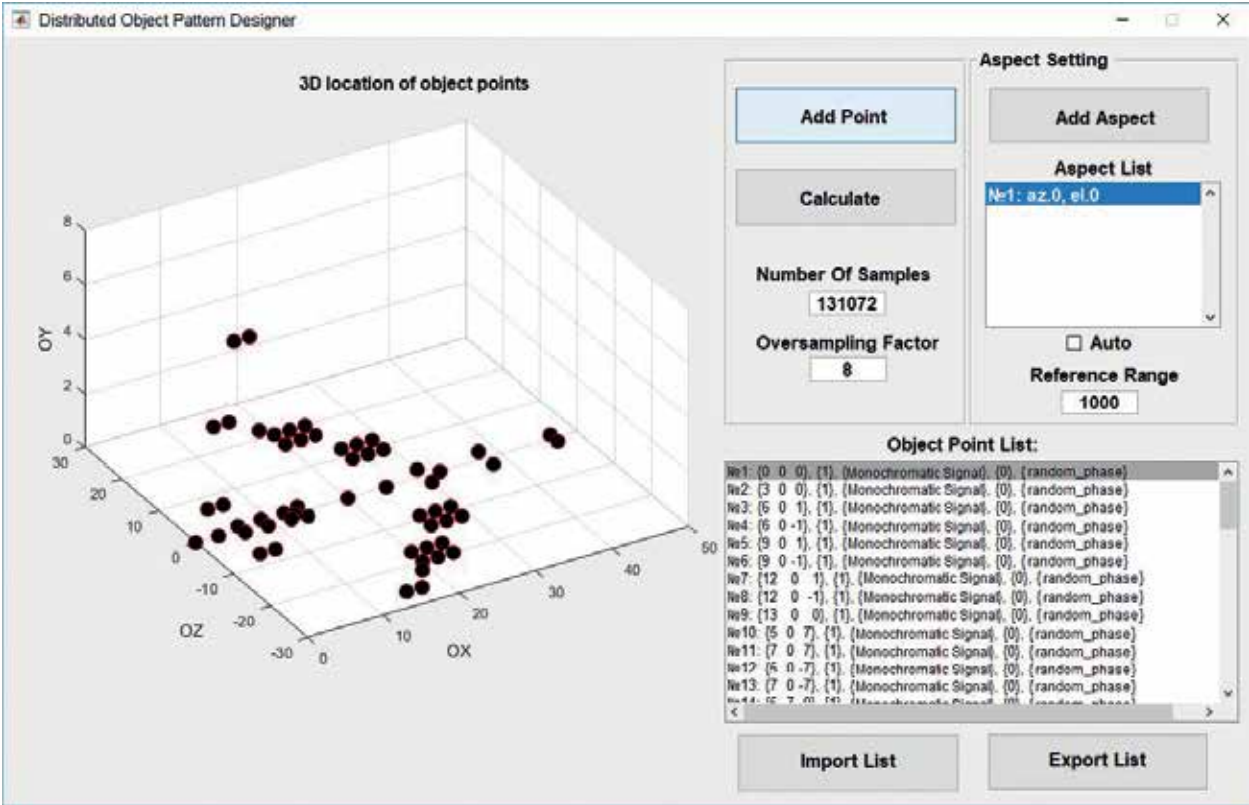


Рис. 3. Синтезированная многоточечная модель (скриншот).

Синтез четырехточечной частично когерентной модели заключается в определении мощностей излучаемых сигналов ($\sigma_{1...4}^2$) и функций $F_{R1...4}(\omega)$ и $F_{S1...4}(\omega)$ — собственных и взаимных спектральных плотностей мощности ква-

дратурных компонент экосигналов от точек четырехточечной модели.

Основные соотношения для искомых параметров (см. [7]) с учетом введенных обозначений примут следующий вид:

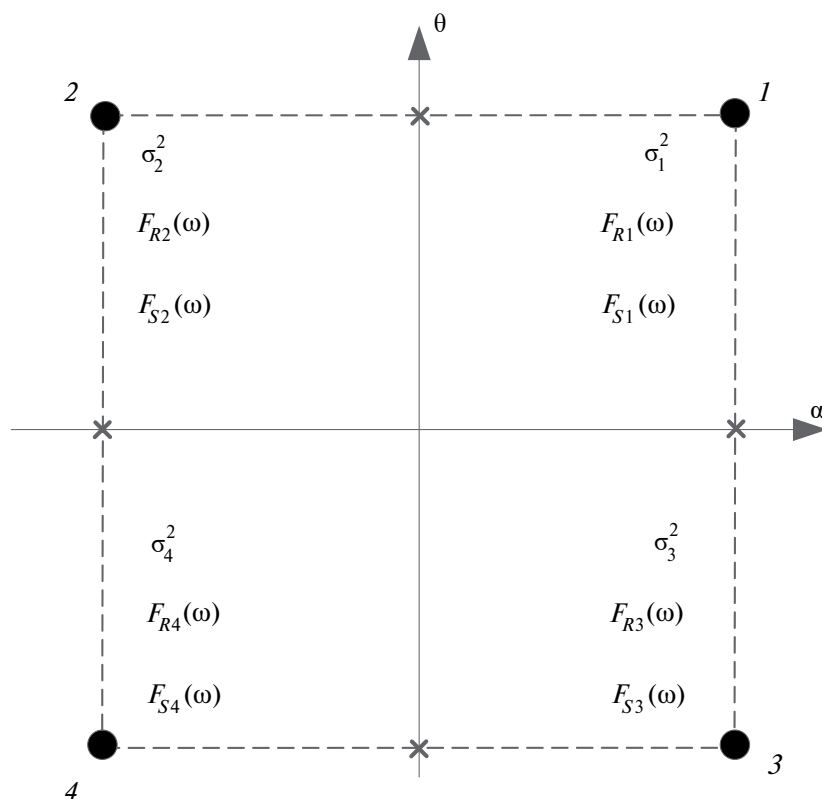


Рис. 4. Четырехточечная модель: 1...4 – излучатели.

дисперсии (мощности) сигналов –

$$(2) \quad \left\{ \begin{aligned} \sigma_1^2 &= \frac{\gamma_\theta^2 \sigma_H^2}{\gamma_\theta^2 + 1 + 2\rho_\alpha \gamma_\alpha}; \\ \sigma_2^2 &= \frac{\gamma_\theta^2 \gamma_\alpha \sigma_H^2}{\gamma_\theta^2 + 1 + 2\rho_\theta \gamma_\theta}; \\ \sigma_3^2 &= \frac{\sigma_H^2}{\gamma_\theta^2 + 1 + 2\rho_\theta \gamma_\theta}; \\ \sigma_4^2 &= \frac{\sigma_H^2 \gamma_\alpha}{\gamma_\theta^2 + 1 + 2\rho_\theta \gamma_\theta}. \end{aligned} \right.$$

Здесь σ_H^2 – суммарная мощность экосигнала, отраженного от замещающего объекта; γ_α^2 , γ_θ^2 и ρ_α , ρ_θ – определяются соотношениями:

$$\gamma_{\alpha,\theta} = \operatorname{tg} \left[\frac{1}{2} \arccos \left(\frac{-2m_{\alpha,\theta} \mu_{\alpha,\theta}^2}{1 + m_{\alpha,\theta}^2 \mu_{\alpha,\theta}^2 + \mu_{\alpha,\theta}^2} \right) \right], \quad (3)$$

$$\rho_{\alpha,\theta} = \begin{cases} \frac{(1 - m_{\alpha,\theta}) \gamma_{\alpha,\theta}^2 - 1 - m_{\alpha,\theta}}{2m_{\alpha,\theta} \gamma_{\alpha,\theta}}, & m_{\alpha,\theta} \neq 0; \\ \frac{\mu_{\alpha,\theta}^2 - 1}{\mu_{\alpha,\theta}^2 + 1}, & m_{\alpha,\theta} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

соответственно при подстановке m и μ для плоскостей азимута (индекс α) и угла места (индекс θ).

Собственные и взаимные спектральные плотности мощности ($F_{R1...4}(\omega)$ и $F_{S1...4}(\omega)$ соответственно) сигналов определяются выражениями [7]

$$F_{Ri}(\omega) = \sigma_i^2 r_M(\omega); \quad F_{Si}(\omega) = \sigma_i^2 s_M(\omega), \quad (5)$$

где

$$\left\{ \begin{aligned} r_M(\omega) &= \frac{\sum_{i=1}^N [\xi_{\infty i}^2 \sigma_{\infty i}^2 r_i(\omega)]}{\sum_{i=1}^4 \sigma_i^2 \xi_{Mi}^2 + \sum_{i=1}^4 \sum_{k=1}^4 \sigma_i \xi_{Mi} \sigma_k \xi_{Mk} \rho_{i,k}}; \\ s_M(\omega) &= \frac{\sum_{i=1}^N [\xi_{\infty i}^2 \sigma_{\infty i}^2 s_i(\omega)]}{\sum_{i=1}^4 \sigma_i^2 \xi_{Mi}^2 + \sum_{i=1}^4 \sum_{k=1}^4 \sigma_i \xi_{Mi} \sigma_k \xi_{Mk} \rho_{i,k}}, \end{aligned} \right.$$

$\rho_{i,k}$ — коэффициент взаимной корреляции сигналов, излучаемых из i -й и k -й точек четырехточечной модели — элемент матрицы:

$$[\rho] = \begin{pmatrix} 1 & \rho_\alpha & \rho_\theta & \rho_\alpha \cdot \rho_\theta \\ \rho_\alpha & 1 & \rho_\alpha \cdot \rho_\theta & \rho_\theta \\ \rho_\theta & \rho_\alpha \cdot \rho_\theta & 1 & \rho_\alpha \\ \rho_\alpha \cdot \rho_\theta & \rho_\theta & \rho_\alpha & 1 \end{pmatrix},$$

$\xi_{\infty i}$ — обобщенная (азимут или угол места) координата i -й точки многоточечной модели; ξ_{Mi} — обобщенная координата (азимут или угол места) координата i -й точки четырехточечной модели; $\sigma_{\infty i}^2$ — мощность сигнала, отраженного от i -й точки многоточечной модели; $r_i(\omega)$ и $s_i(\omega)$ — собственные и взаимные нормированные спектральные плотности мощности сигнала, отраженного от i -й точки многоточечной модели.

Таким образом, получим частично когерентную геометрическую модель, состоящую из четырех точек. Определены мощности сигналов, коэффициенты их взаимной корреляции, а также собственные корреляционно-спектральные свойства. Четыре сигнала, подводимые к точкам модели, представляют собой коррелированные узкополосные нормальные случайные процессы. Их собственные и взаимные спектральные плотности мощности квадратурных компонент определяются выражением (5).

Алгоритм синтеза четырехточечной модели содержит следующие шаги.

Шаг 1. Синтез многоточечной модели замещающего объекта. Он может осуществляться либо на основе результатов экспериментальных измерений, либо на основе подробных электродинамических моделей замещающего объекта. В результате будут определены параметры: $\sigma_{\infty i}^2$ — мощность сигнала, отраженного i -й точкой объекта, $\xi_{\infty i}$ — обобщенная координата i -й точки объекта (проекция этой точки на ось “азимут” или “угол места”), $r_i(\omega)$ и $s_i(\omega)$ — собственная и взаимная спектральная плотность мощности сигнала, отраженного от i -й точки; σ_H^2 — суммарная мощность эхосигнала, отраженного от замещающего объекта.

Шаг 2. Переход от многоточечной модели замещающего объекта к его четырехточечной частично когерентной модели. Он содержит следующие шаги:

а) определить для двух взаимно ортогональных плоскостей (азимут и угол места) величины γ_α^2 , γ_θ^2 и ρ_α , ρ_θ по соотношениям (3) и (4);

б) по соотношениям (2) определить мощности сигналов, подводимых к точкам четырехточечной геометрической модели;

в) рассчитанными величинами ρ_α , ρ_θ заполнить матрицу коэффициентов взаимной корреляции излучаемых сигналов $[\rho]$.

г) по соотношениям (5) определить спектральные характеристики сигналов, подводимых к точкам четырехточечной геометрической модели.

4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЧНОГО ИМИТАТОРА

Проверка адекватности полученной модели осуществлялась в два этапа.

На первом использовали методы численного моделирования. Был проведен ряд численных экспериментов со следующими условиями. РЛС и замещаемый объект двигались навстречу друг другу со скоростью 400 м/с. Длина волны РЛС равнялась 0.06 м. Дальность до замещаемого объекта (D_0) принимала значения 10000, 1000 и 500 м. Угловой размер четырехточечной модели составлял 2° по каждой из угловых координат. Эксперимент повторялся 50 раз для каждого набора параметров при разных значениях случайной начальной фазы эхосигналов от точек многоточечной и четырехточечной моделей. В пределах одного эксперимента длина формируемых реализаций сигналов и углового положения центра излучения составляла 16384 отсчета. Временной интервал между отсчетами составлял 5 мкс.

Затем определяли статистические характеристики угловых шумов (ПРВ и корреляционная функция) для многоточечной и четырехточечной моделей.

Основные результаты эксперимента сводятся к следующему.

Параметры ПРВ, m и μ , полученные путем расчета для многоточечной модели традиционным путем (по выражениям из [5] для заданных в табл. 1 функций распределения интенсивности отражения по поверхности объекта) и в результате численного моделирования с использованием многоточечной и малоточечной моделей, приведены в табл. 2. Имеет место хорошее совпадение для обоих параметров.

Корреляционные функции угловых шумов оценивались отдельно для плоскостей “азимут” и “угол места”. Результаты показывают, что корреляционные функции, полученные для мо-

Таблица 2. Параметры ПРВ угловых шумов при носовом ракурсе наблюдения

D_0 , м	Теоретический расчет				Многоточечная модель				Малоточечная модель			
	m_α	μ_α	m_θ	μ_θ	m_α	μ_α	m_θ	μ_θ	m_α	μ_α	m_θ	μ_θ
500	0	0.7	0.028	6.7	0	0.71	0.03	6.9	0	0.69	0.031	6.95
1000	0	1.37	0.014	13.5	0	1.38	0.012	12.5	0	1.35	0.012	14.1
5000	0	6.7	0.0029	67	0	6.9	0	61	0	6.85	0	63



Рис. 5. Излучатели матричного имитатора: 1...6 – антенны.

дели, составленной из 56 точек, и частично когерентной четырехточечной модели, совпадают во всех случаях для обеих угловых координат.

На втором этапе синтезированная малоточечная модель самолета проходила апробацию на макете матричного имитатора, обеспечивающего моделирование экосигналов от распределенных радиолокационных объектов. Внешний вид матрицы излучателей представлен на рис. 5. Она состоит из шести дипольных антенн, размещенных на прямой линии.

В экспериментах были задействованы две антенны: 3 и 5 (см. рис. 5). К ним подводились сиг-

налы, сформированные векторным генератором и имеющие характеристики, определяемые (2) и (5). С учетом того, что матрица излучателей содержит только два активных излучателя, формирование угловых шумов ограничено азимутальной плоскостью. Соответственно, сигналы, подводимые к излучателям матрицы ($s_{M3}(t)$ и $s_{M5}(t)$), определяются по выражениям:

$$s_{M3}(t) = s_1(t) + s_3(t);$$

$$s_{M5}(t) = s_2(t) + s_4(t),$$

где $s_1(t), \dots, s_4(t)$ – сигналы точек, рассчитанные для четырехточечной модели.

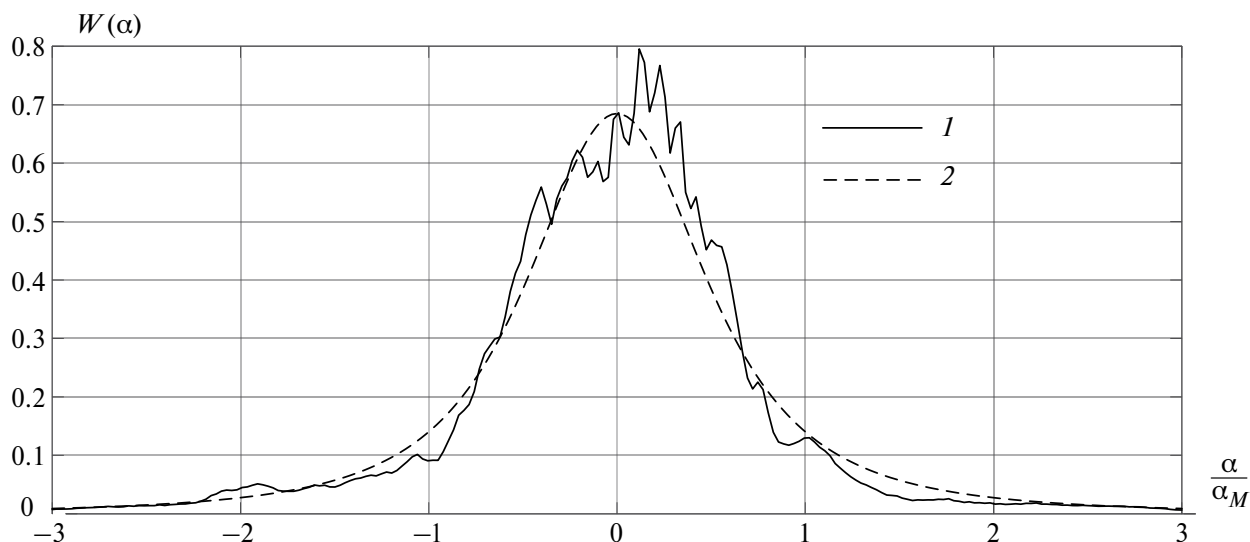


Рис. 6. Экспериментальная (1) и рассчитанная теоретически (2) ПРВ углового шума, полученная с использованием макета матричного имитатора; имитируемая дальность 1000 м.

Приемная часть стенда состоит из двух дипольных антенн, разнесенных в азимутальной плоскости на 80 мм. Она расположена на расстоянии порядка 2.2 м от матрицы излучателей. Таким образом обеспечивались условия дальней зоны для приемных антенн.

Принятый каждой антенной сигнал переносили на видеочастоту и оцифровывали. Количество комплексных отсчетов для каждого канала в одном эксперименте составляло 2^{22} . Частота дискретизации — 15 МГц. Результаты оцифровки поступали в ЭВМ для дальнейшей обработки.

В ЭВМ формировались сигналы, соответствующие суммарной (как сумма отсчетов сигналов каналов) и разностной (как разность отсчетов сигналов каналов) диаграммам направленности. Разнос излучателей матрицы в азимутальной плоскости не превышал половины ширины диаграммы направленности суммарной диаграммы.

Азимутальное положение точки излучения определялось методом моноимпульсной пеленгации. По полученной реализации отсчетов азимутальной координаты проводилась оценка их ПРВ.

На рис. 6 представлена ПРВ, экспериментально полученная и рассчитанная теоретически по соотношению (1) при подстановке в него параметров из табл. 2 для дальности 1000 м. По горизонтальной оси отложен азимутальный угол, нормированный к угловому размеру двухточеч-

ной модели α_M (угловому расстоянию между третьим и пятым излучателями матрицы). Параметры полученной ПРВ углового шума равны $m = 0$; $\mu = 1.4$, что хорошо согласуется с результатами теоретических расчетов и численного моделирования (см. табл. 2).

Помимо ПРВ оценивалась корреляционная функция угловых шумов (рис. 7) и доплеровский принятый сигнала (рис. 8). Последний получен для суммарного сигнала каналов. Нулевому временному сдвигу соответствует отсчет с порядковым номером $2^{22} - 1$. Интервал между отсчетами составляет 66 нс.

Из рис. 7 видно, что нормированная корреляционная функция угловых шумов для многоточечной модели и полученная с использованием матричного имитатора практически совпадают.

В доплеровском спектре (см. рис. 8) принятого сигнала отчетливо видны компоненты, сформированные отражениями от фюзеляжа самолета, элементов, расположенных на крыльях, и хвостового оперения. Форма доплеровского спектра соответствует ожидаемой для носового ракурса наблюдения самолета. Максимальную доплеровскую частоту формируют точки фюзеляжа. Точки на крыльях и хвостовом оперении дают меньшие частотные сдвиги. Эти точки симметричны относительно фюзеляжа, поэтому доплеровские спектры эхосигналов от точек, расположенных слева и справа от фюзеляжа, идентичны.

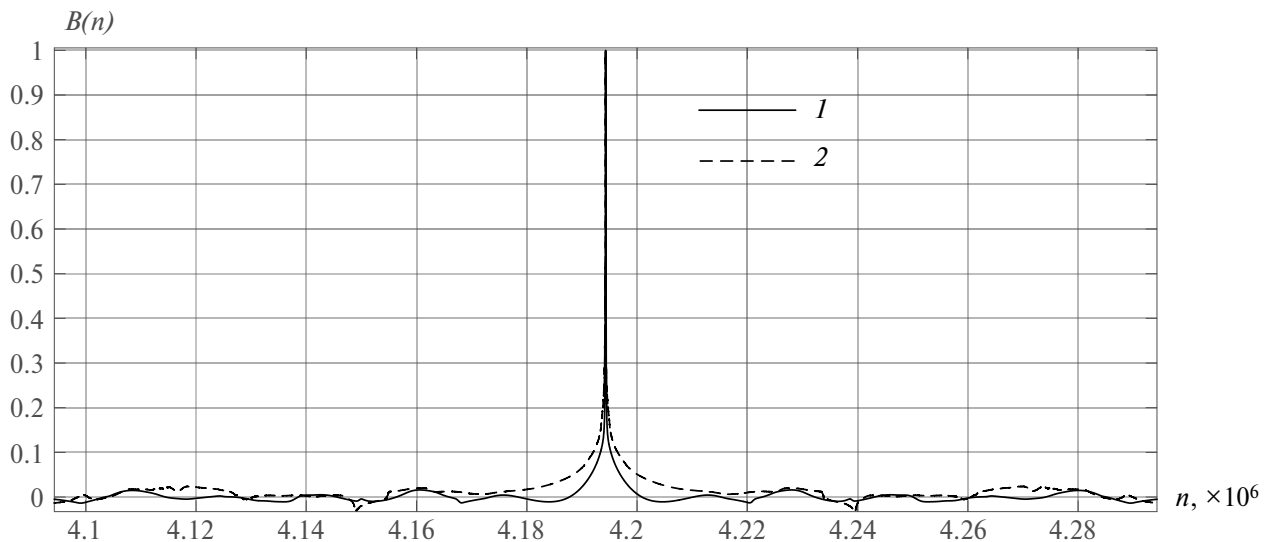


Рис. 7. Нормированная корреляционная функция угловых шумов при носовом ракурсе наблюдения: 1 – эксперимент, 2 – теоретический расчет; имитируемая дальность 1000 м; n – номер отсчета корреляционной функции угловых шумов.

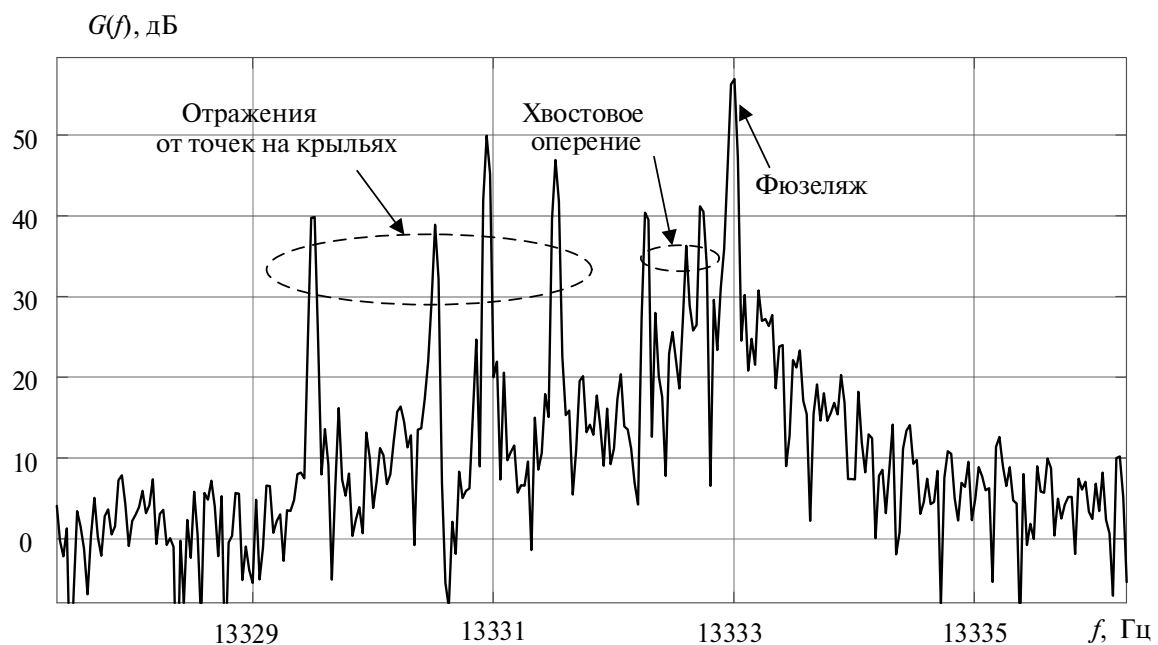


Рис. 8. Доплеровский спектр принятого сигнала.

Сравнение доплеровских спектров, полученных на макете матричного имитатора, формируемых четырехточечной частично когерентной и многоточечной (содержащей 56 точек) моделями, показало совпадение местоположения спектральных компонент и соотношения их уровней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, четырехточечная частично когерентная геометрическая модель, синтезиро-

ванная с использованием приведенных соотношений, ранее полученных в [7], адекватно замещает многоточечный радиолокационный объект по критерию равенства корреляционных функций угловых шумов и их ПРВ. Это подтверждено результатами численного моделирования и экспериментальными данными, полученными на макете матричного имитатора.

Использование четырехточечной частично когерентной геометрической модели позволило

сократить количество точек для рассмотренного замещающего объекта в 14 раз.

Представленные в работе соотношения могут непосредственно использоваться для синтеза четырехточечных частично когерентных моделей радиолокационных объектов, отражающие свойства которых заданы их многоточечными геометрическими моделями.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Melvin W.L., Scheer J.A.* Principles of Modern Radar: Radar Applications. Edison: Scitech Publ., 2014.
2. *Johnston S.L.* // IEEE Trans. 1997. V. AES-33. № 2. Pt.2. P. 696.
3. *Stepanov M.A., Kiselev A.V.* // J. Computer Systems Sci. Int. 2019. V. 58. № 4. P. 595.
4. *Zhou Jianxiong, Shi Zhiguang, Cheng Xiao, Fu Qiang* // IEEE Trans. 2011. V. GRS-49. № 10. P. 3713.
5. *Островитянов Р.В., Басалов Ф.А.* Статистическая теория радиолокации протяженных целей. М.: Радио и связь, 1982.
6. *Yu Yiwei, Song Jie, Xiong Wei* // 2nd IEEE Intern. Conf. Inform. Communication and Signal Processing. 2019. P. 161.
7. *Podkopaev A.O., Stepanov M.A., Kiselev A.V.* // Radio Sci. V. 56. № 12. P. 6.
8. *Бердышев В.П., Миронов А.М., Помазуев О.Н. и др.* // Журн. Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии. 2018. Т. 11. № 7. С. 764.
9. *Панов Д.В., Юдин В.А., Караваев С.А.* // Математическая морфология. Электронный математ. и медико-биол. журн. 2009. V. 8. № 3. С. 1–7.
10. *Wang C.-Q., Wang X.-M., Shi X.-L.* // Binggong Xuebao/Acta Armamentarii. 2008. V. 29(12). P. 1479.
11. *Тырыкин С.В., Киселев А.В.* // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2003. V. 4. P. 76.
12. *Hseuh-Jyh Li, Nabil H. Farhat, Yuhshyen Shen* // IEEE Trans. 1989. V. GRS-27. № 1. P. 98.
13. *Борзов А.Б., Быстров Р.П., Соколов А.В.* // Журн. радиоэлектроники. 1998. № 1. С. 1. <http://jre.cplire.ru/jre/dec98/4/text.html>
14. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. 4-е изд. М.: Наука, 1978.

SYNTHESIS OF A FOUR-POINT MODEL OF AN AIRPLANE

M. A. Stepanov*, A. V. Kiselev, V. V. Artyushenko

Novosibirsk State Technical University, prosp. K. Marksa, 20, Novosibirsk, 630073 Russia

**E-mail: m.stepanov@corp.nstu.ru*

Received December 22, 2022; revised May 16, 2023; accepted November 13, 2023

The modeling of echo signals from distributed radar objects taking into account the noise of their angular coordinates is considered. Relationships are presented that allow the transition from a multipoint model of an arbitrary object containing tens, hundreds and even thousands of emitting points to a model composed of four emitting points located at the vertices of a square. As an example, we synthesized an airplane model containing only four points. It is obtained on the basis of a multipoint model composed of 56 points. Using numerical modeling methods, it has been shown that angular noise generated by multi-point and four-point aircraft models have identical correlation functions and similar parameters of the probability density distribution of angular coordinate noise. The obtained result is also confirmed by semi-natural modeling methods using a matrix simulator.

Keywords: echo signal modeling, multipoint model, probability density function, apparent emission center, correlation functions, matrix simulator