ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2022 № 1 (54)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.396.96

ЗАМЕЩЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБЪЕКТА ОДНОТОЧЕЧНОЙ МОДЕЛЬЮ

В.В. Артюшенко, А.В. Киселев, А.В. Таюров
Новосибирский государственный технический университет

В статье рассмотрен способ имитации протяженных радиолокационных объектов, распределенных по угловым координатам, основанный на замещении объекта точкой, координаты которой соответствуют кажущемуся положению объекта в каждый из моментов времени. В качестве средств имитации рассматривается матричный имитатор. Исходными данными об объекте моделирования для рассматриваемого способа имитации являются функции распределения по объему объекта корреляционной функции одноименных и разноименных квадратурных компонент комплексной огибающей эхосигналов от его элементарных отражателей. Приведены аналитические соотношения, определяющие позицию кажущегося центра излучения объекта и параметры сигналов, подводимых к излучателям матрицы, в каждый момент времени на интервале моделирования. Адекватность моделирования оценена по корреляционной функции и функции распределения положения кажущегося центра излучения объекта. Достоверность предложенного способа имитации подтверждается результатами численного моделирования шумов угловых координат на примере классической многоточечной модели типового распределенного объекта и замещающей ее «блуждающей точки», сформированной простейшим четырехточечным матричным имитатором. Полученные результаты могут быть использованы для синтеза математических моделей, применяемых при разработке программно-аппаратных комплексов полунатурного моделирования электромагнитных полей, отраженных от распределенных объектов.

Ключевые слова: моделирование сложной радиолокационной цели, кажущийся центр излучения, матричный имитатор.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-1-14-24

Введение

Важнейшим этапом разработки радиолокационной системы (РЛС) является комплексная отработка аппаратных и программных средств с использование инструментов имитации реальной сигнально-помеховой обстановки [1].

На сегодняшний день хорошо изучены и описаны методы имитации сосредоточенных объектов [2, 3]. Однако реальные радиолокационные объекты, например, корабли, самолеты, имеют сложную геометрическую форму и размеры, соизмеримые с разрешающей способностью РЛС, следовательно, относятся к классу распределенных.

Имитация эхосигналов от распределенных объектов, как правило, основывается на «многоточечной модели» R. Delano, в которой цель представляется совокупностью большого количества статистически независимых «блестящих» точек, заполняющих область пространства, ограниченную размерами объекта [4, 5].

При облучении поверхности цели ее незатененные участки отражают зондирующий сигнал, при этом от каждой «блестящей» точки формируется собственный эхосигнал, имеющий амплитуду и фазу, которые меняются во времени и зависят от множества факторов, например, угла визирования объекта, параметров движения, влияния внешних воздействий на отражающую поверхность цели. Интерференция отраженных волн дает суммарный сигнал, который имеет в общем

© 2022 В.В. Артюшенко, А.В. Киселев, А.В. Таюров

случае случайные флуктуирующие амплитуду и фазу, а фронт суммарной электромагнитной волны на апертуре приемной антенны РЛС отличен от плоского. Направление его прихода также случайно флуктуирует [4–6]. Это явление получило название шумов угловых координат. Естественно, при имитации эти шумы должны учитываться и адекватно воспроизводиться.

Для описания шумов угловых координат в радиолокации используют плотность распределения вероятностей (ПРВ) и корреляционную функцию [4, 7].

Выражение, описывающее ПРВ шумов угловых координат, приведено в [4, 7]:

$$W(\Delta\gamma) = \frac{\mu_\gamma}{2(1+\mu_\gamma^2\Delta\gamma^2)^{3/2}}, \qquad (1)$$

где $\Delta\gamma = \gamma - m_\gamma$ – мгновенное значение отклонения кажущегося центра излучения (КЦИ) по обобщенной координате γ от математического ожидания m_γ; μ_γ – параметр, определяющий эффективную ширину распределения.

Параметр m_γ в выражении (1) определяет среднее значение измеряемого положения распределенного объекта, а параметр μ_γ определяется протяженностью объекта по координате γ.

Общее выражение для корреляционной функции шумов угловых координат получено в работе [4].

Таким образом, из-за специфических особенностей распределенных объектов их следует рассматривать как совокупность точечных отражателей. Количество отражателей для реальных объектов, как правило, велико, поэтому при радиолокационном наблюдении имеет место «блуждание» КЦИ.

Для имитации подобных объектов используются так называемые матричные имитаторы (МИ), представляющие собой систему неподвижных антенн («матрицу»), находящихся в дальней зоне антенны РЛС [8–11]. МИ позволяют сформировать требуемые флуктуации фазового фронта электромагнитной волны непосредственно на апертуре приемной антенны тестируемой РЛС, обеспечивая достоверность и полноту испытаний.

Расстояние между излучателями МИ задается таким образом, чтобы они одновременно попадали в главный лепесток диаграммы направленности приемной антенны, были ею не разрешимы. В этом случае РЛС определит угловые координаты МИ как одну точку, положение которой для одномерной задачи будет зависеть от параметров сигналов, подводимых к излучателям [4]:

$$\gamma = \frac{1 - z_0^2}{1 + 2z_0\cos(\psi) + z_0^2}, \qquad (2)$$

где γ – обобщенная угловая координата; $z_0 = U_1/U_2$ – отношение амплитуд сигналов, поступающих на первый и второй излучатели; ψ – разность фаз излучаемых МИ сигналов, приведенных в точку приема.

Обычно ограничиваются случаем $\psi = 0$ (2), при котором обеспечивается наибольшая достоверность имитации [4].

Моделирование множества точек, присущих конкретному объекту, осуществляется за счет подведения к излучателям МИ суммы сигналов, каждый из которых отвечает за моделирование одной точки из множества. При этом, в силу линейности МИ, обеспечивается имитация отражений от многоточечного объекта в целом

[3, 11]. Для реального объекта количество точек может быть достаточно велико, что приводит к сложности реализации рассмотренного подхода в реальном масштабе времени.

1. Постановка задачи

Вместе с тем известен иной подход к имитации отражений от распределенных радиолокационных объектов. Он основан на замещении моделируемого объекта одной отражающей точкой, угловое положение которой в каждый момент времени совпадает с текущим положением КЦИ. Для краткости уместно назвать его методом «блуждающей точки». Эта точка также может формироваться матричным имитатором. По сути, МИ вместо многоточечного объекта должен имитировать одну точку, замещающую объект в целом.

Такой подход рассмотрен, в частности, в работах [8, 9, 16]. Вместе с тем в них отсутствуют основные соотношения, необходимые для его практического использования.

Цель работы – обобщить основные соотношения, необходимые для реализации метода имитации распределенных радиолокационных объектов, основанного на использовании «блуждающей точки».

Для этого предполагается решить следующие задачи.

1. Обобщить соотношения, позволяющие по известным распределениям отражающих свойств по поверхности объекта рассчитывать положение КЦИ («блуждающей точки») в каждый момент времени.

2. Обобщить выражения, определяющие связь между текущим положением «блуждающей точки» для каждого момента времени и амплитудами сигналов, подводимых к излучателям МИ.

3. Экспериментально (путем численного моделирования) апробировать полученные результаты.

2. Поточечное формирование сигнала распределенного объекта

Исходными данными об объекте моделирования является функция распределения по объему объекта корреляционной функции одноименных $F_R(x,y,z,\tau)$ и разноименных $F_S(x,y,z,\tau)$ квадратурных компонент комплексной огибающей эхосигналов от его элементарных отражателей при немодулированном зондирующем сигнале [4, 12]:

$$\begin{aligned} F_R(x_m,y_m,z_m,\tau)\Delta x\Delta y\Delta z &= \left\langle U_I(x_m,y_m,z_m,t)U_I(x_m,y_m,z_m,t+\tau)\right\rangle = \\ &= \left\langle U_Q(x_m,y_m,z_m,t)U_Q(x_m,y_m,z_m,t+\tau)\right\rangle, \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} F_S(x_m,y_m,z_m,\tau)\Delta x\Delta y\Delta z &= \left\langle U_I(x_m,y_m,z_m,t)U_Q(x_m,y_m,z_m,t+\tau)\right\rangle = \\ &= -\left\langle U_Q(x_m,y_m,z_m,t)U_I(x_m,y_m,z_m,t+\tau)\right\rangle, \end{aligned}$$

где m – порядковый номер отражающей точки объекта; $(x_m,\ y_m,\ z_m)$ – координаты отражающей точки; $U_I(x_m,y_m,z_m,t)$, $U_Q(x_m,y_m,z_m,t)$ – синфазная и квадратурная компонента эхосигнала от отражающей точки соответственно; Δx, Δy, Δz – размеры элементарного объема с центром в точке $(x_m,\ y_m,\ z_m)$; $\langle\ldots\rangle$ – символ усреднения по множеству.

Функции (3) определяют интенсивность и корреляционную функцию эхосигнала от точки с координатами (x_m, y_m, z_m).

Рассмотрим шаги предлагаемого алгоритма имитации.

1. Задать распределение отражающих свойств моделируемого объекта (функции $F_R(x, y, z, \tau)$ и $F_S(x, y, z, \tau)$).

2. Для используемого зондирующего сигнала РЛС сформировать эхосигналы от точек замещаемого объекта. Для этого для каждой отражающей точки моделируемого объекта, заданной координатами (x_m, y_m, z_m), сформировать непрерывный нормальный случайный процесс с корреляционными функциями $F_R(x_m, y_m, z_m, \tau)$ и $F_S(x_m, y_m, z_m, \tau)$ и наложить его на зондирующий сигнал РЛС.

3. По сформированным эхосигналам от точек определить положение КЦИ в каждый момент времени в интервале моделирования.

4. Вычислить напряжения, которые необходимо подвести к излучателям МИ для обеспечения текущего положения КЦИ.

5. Подвести рассчитанные сигналы к излучателям МИ.

Отметим следующие важные моменты по представленному алгоритму, требующие прояснения и конкретизации.

По пункту 2

В простейшем случае гармонического эхосигнала от точек объекта комплексный сигнал излучающей точки определяется как

$$\dot{S}_{m,n} = \sqrt{F_R\left(x_m, y_m, z_m, n\right)}\left[\cos(\omega_m n T_d + \varphi_m) + j\sin(\omega_m n T_d + \varphi_m)\right], \qquad (4)$$

где ω_m, φ_m – частота и начальная фаза эхосигнала от m-й отражающей точки; n – номер отсчета; T_d – период дискретизации.

По пункту 3

Для определения углового положения КЦИ объекта можно воспользоваться известными соотношениями. Определим положение КЦИ при помощи пеленгационного соотношения метода амплитудной моноимпульсной пеленгации [1, 13, 14]:

$$f_\gamma\left(n\right) = \mathrm{Re}\left(\frac{\dot{U}_{\Delta\gamma}\left(n\right)}{\dot{U}_{\Sigma\gamma}\left(n\right)}\right), \qquad (5)$$

где γ – обобщенная угловая координата; $\dot{U}_{\Delta\gamma}\left(n\right)$, $\dot{U}_{\Sigma\gamma}(n)$ – n-е отсчеты комплексных сигналов разностного и суммарного каналов пеленгатора соответственно.

Поскольку угловое положение КЦИ моделируемого объекта флуктуирует, результат пеленгации (5) представляет собой случайный процесс. Автокорреляционная функция этого случайного процесса является корреляционной функцией шумов угловых координат.

Сигнал суммарного канала пеленгатора в n-й момент времени

$$\dot{U}_{\Sigma\gamma}(n) = \sum_{m=1}^{M} \dot{S}_{m,n}\ , \qquad (6)$$

где $\dot{S}_{m,n}$ – эхосигнал от m-й точки-излучателя модели с координатами (x_m, y_m); M – общее количество излучателей модели.

Сигнал разностного канала пеленгатора в момент времени n для плоскостей визирования x и y соответственно:

$$\dot{U}_{\Delta x}(n) = \sum_{m=1}^{M} (x_m \cdot \dot{S}_{m,n}), \qquad \dot{U}_{\Delta y}(n) = \sum_{m=1}^{M} (y_m \cdot \dot{S}_{m,n}). \tag{7}$$

В простейшем случае гармонического эхосигнала от точек объекта с учетом (4) соотношения (6)–(7) принимают вид:

$$\begin{aligned}
\dot{U}_{\Sigma\gamma}(n) &= \sum_{m=1}^{M} \sqrt{F_R(x_m, y_m, z_m, n)} \cdot e^{j(\omega_m n T_d + \varphi_m)}, \\
\dot{U}_{\Delta x}(n) &= \sum_{m=1}^{M} x_m \sqrt{F_R(x_m, y_m, z_m, n)} \cdot e^{j(\omega_m n T_d + \varphi_m)}, \\
\dot{U}_{\Delta y}(n) &= \sum_{m=1}^{M} y_m \sqrt{F_R(x_m, y_m, z_m, n)} \cdot e^{j(\omega_m n T_d + \varphi_m)}.
\end{aligned} \tag{8}$$

Соответственно выражение (5) для обобщенной координаты γ можно преобразовать как

$$f_\gamma(n) = \mathrm{Re}\left(\frac{\sum_{m=1}^{M} (\gamma_m \cdot \dot{S}_{m,n})}{\sum_{m=1}^{M} \dot{S}_{m,n}} \right) =$$

$$= \mathrm{Re}\left(\frac{\sum_{m=1}^{M} \gamma_m \sqrt{F_R(x_m, y_m, z_m, n)} \cdot e^{j(\omega_m n T_d + \varphi_m)}}{\sum_{m=1}^{M} \sqrt{F_R(x_m, y_m, z_m, n)} \cdot e^{j(\omega_m n T_d + \varphi_m)}} \right).$$

По пункту 4

Рассмотрим простейший двумерный МИ, образованный четырьмя излучателями, размещенными в вершинах квадрата. Для сохранения общности результатов нормируем расстояния между излучателями к половине диагонального размера излучающей части МИ (рис. 1).

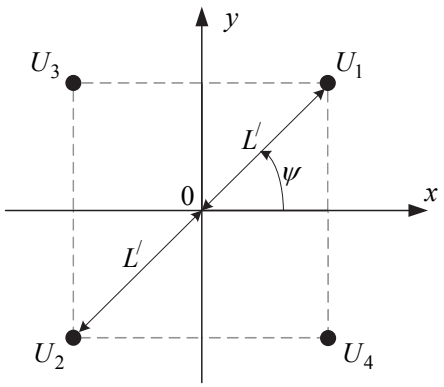


Рис. 1 – Расположение излучателей МИ

Fig. 1 – Arrangement of the matrix simulator emitters

Запишем выражения, определяющие положение КЦИ, формируемого МИ, по координатам x и y соответственно:

$$f_x(n)=\frac{\sum_{m=1}^{4} x_m U_m(n)}{\sum_{m=1}^{4} U_m(n)}, \qquad f_y(n)=\frac{\sum_{m=1}^{4} y_m U_m(n)}{\sum_{m=1}^{4} U_m(n)}.$$

Чтобы по известным координатам точки $f_x(n)$ и $f_y(n)$ в момент времени n определить амплитуды всех четырех сигналов, нужно составить два дополнительных уравнения.

Для первого уравнения примем, что амплитуда суммарного сигнала в каждый момент времени n нормирована к единице:

$$\sum_{m=1}^{4} U_m = 1.$$

В качестве второго дополнительного уравнения определим амплитуду одного из излучателей, например четвертого, равной некоторой постоянной A.

С учетом указанных ограничений можно составить следующую систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\begin{cases} x_1U_1(n)+x_2U_2(n)+x_3U_3(n)+x_4U_4(n)=f_x(n), \\ y_1U_1(n)+y_2U_2(n)+y_3U_3(n)+y_4U_4(n)=f_y(n), \\ U_1(n)+U_2(n)+U_3(n)+U_4(n)=1, \\ U_4(n)=A. \end{cases} \tag{9}$$

Решив СЛАУ (9), например методом Крамера [15], получим

$$\begin{cases} U_1(n)=\dfrac{f_x(n)+1}{2}-A, \\ U_2(n)=\dfrac{1-f_y(n)}{2}-A, \\ U_3(n)=\dfrac{f_y(n)-f_x(n)}{2}+A, \\ U_4(n)=A. \end{cases} \tag{10}$$

Соотношения (10) накладывают очевидные ограничения на значения постоянной A для обеспечения физически реализуемых амплитуд сигналов излучателей $U_i(n)$:

$$\begin{cases} A \le \dfrac{f_x(n)+1}{2}, \\ A \le \dfrac{1-f_y(n)}{2}, \\ A \le \dfrac{f_y(n)-f_x(n)}{2}, \\ A \ge 0. \end{cases}$$

3. Апробация полученных результатов

Рассмотрим простейший пример моделирования шумов угловых координат. Зададим замещаемый объект в виде 100 отражающих точек, равномерно распределенных на плоскости:

$$x_m = -0{,}1,\ -0{,}1 + \Delta x,\ ...,\ 0{,}1,$$

$$y_m = -0{,}1,\ -0{,}1 + \Delta y,\ ...,\ 0{,}1,$$

где $\Delta x = \Delta y = \dfrac{2L'\cos(\psi)}{\sqrt{M}-1}$ – расстояние между двумя соседними точками вдоль осей x и y, $L'\cos(\psi) = 0{,}1$, $M = 100$.

Частоты эхосигналов от точек замещаемого объекта зададим как

$$\omega_{m=1} = \omega_{\min},\quad \omega_{m=2} = \omega_{\min} + \Delta\omega,\ \ldots,\ \omega_{m=M} = \omega_{\max},$$

где $\Delta\omega = \dfrac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{M-1}$. Начальные фазы эхосигналов φ_m случайные и распределены равномерно в интервале $[0, 2\pi]$.

Следуя предложенному алгоритму, отсчеты сигналов суммарного и разностных каналов можно определить как (см. выражения (8)):

$$\dot{U}_{\Sigma}(n) = \sum_{m=1}^{4} \dot{S}_{m,n} = \sum_{m=1}^{4} U_m e^{j(\omega_m n T_d + \varphi_m)},$$

$$\dot{U}_{\Delta x}(n) = \sum_{m=1}^{4} (x_m \cdot \dot{S}_{m,n}) = \sum_{m=1}^{4} x_m U_m e^{j(\omega_m n T_d + \varphi_m)},$$

$$\dot{U}_{\Delta y}(n) = \sum_{m=1}^{4} (y_m \cdot \dot{S}_{m,n}) = \sum_{m=1}^{4} y_m U_m \times e^{j(\omega_m n T_d + \varphi_m)}.$$

Положение «блуждающей точки» в n-й момент времени согласно (5):

$$f_{\gamma}(n) = \mathrm{Re}\left(\frac{\sum_{m=1}^{4} (\gamma_m \cdot \dot{S}_{m,n})}{\sum_{m=1}^{4} \dot{S}_{m,n}} \right).$$

Зная положение КЦИ $f_{\gamma}(n)$ и задав значение постоянной A, можно определить амплитуды сигналов, подводимых к излучателям $U_i(n)$, по выражениям (10).

Сформировав выборки по 10 000 элементов и проведя 100-кратные испытания, получим оценки ПРВ и корреляционной функции шумов угловых координат. Результаты моделирования приведены на рис. 2 и 3. Там же нанесены аналогичные зависимости, полученные с использованием исходной многоточечной модели замещаемого объекта.

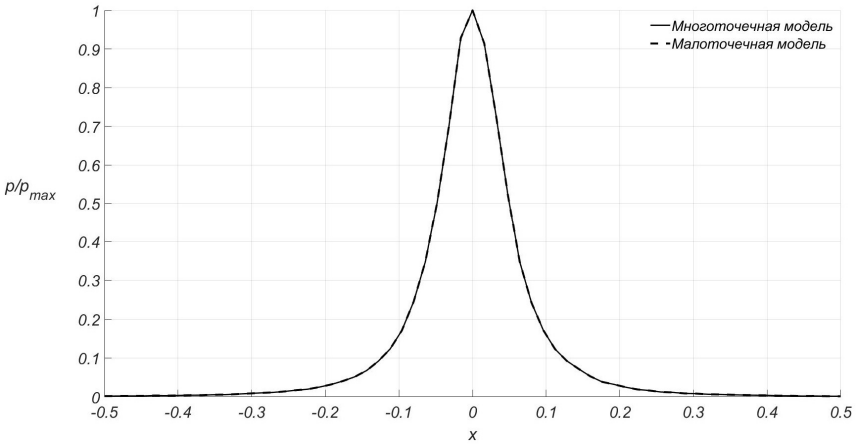


Рис. 2 – ПРВ шумов угловых координат, полученная при помощи многоточечной модели и с помощью метода «блуждающей точки»

Fig. 2 – PDF of angular noise obtained using a multi-point model and using the «wandering point» method

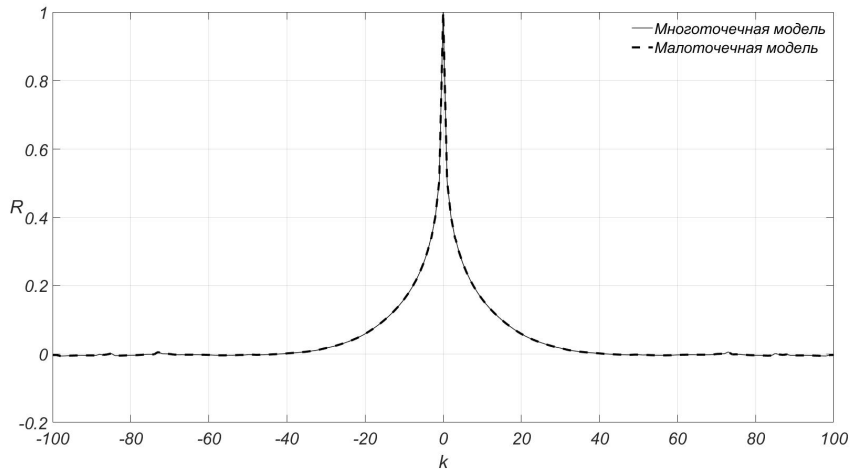


Рис. 3 – Корреляционные функции шумов угловых координат, полученные при помощи многоточечной модели и с помощью метода «блуждающей точки»

Fig. 3 – Correlation functions of angular noise obtained using a multi-point model and using the «wandering point» method

Результаты численных экспериментов показывают хорошее совпадение ПРВ и корреляционной функции шумов угловых координат для классической многоточечной модели и замещающей ее «блуждающей точки», что подтверждает правильность сделанных предположений и полученных соотношений.

Заключение

В данной работе рассмотрен метод имитации шумов угловых координат распределенного радиолокационного объекта, основанный на его замещении «блуждающей точкой». Представлен обобщенный алгоритм имитации на основе метода

«блуждающей точки» и пояснения по его применению. Приведены результаты численного моделирования, подтверждающие корректность представленных соотношений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Канащенков А.И., Меркулов В.И.** Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т. 1. РЛС – информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов. – М.: Радиотехника, 2006. – 656 с.
2. **Тверской Г.Н., Терентьев Г.К, Харченко И.П.** Имитаторы эхо-сигналов судовых радиолокационных станций. – Л.: Судостроение, 1973. – 224 с.
3. **He W., Zhang L., Li N.** A new method to improve precision of target position in RFSS // 2007 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. – Guilin, China, 2007. – P. 1–3. – DOI: 10.1109/ICMMT.2007.381335.
4. **Островитянов Р.В., Басалов Ф.А.** Статистическая теория радиолокации протяженных целей. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.
5. **Делано Р.** Теория «мерцания» цели и угловые ошибки при радиолокационном сопровождении // Вопросы радиолокационной техники. – 1954. – № 1 (19). – С. 108–119.
6. **Давидович И.В., Жуковский А.П.** Описание сигнала, отраженного от протяженной статистически неровной поверхности, с помощью модели зеркальных точек // Сборник научных трудов МЭИ. – М., 1987. – Т. 126. – С. 22–26.
7. **Skolnik M.I.** Radar handbook. – 3rd ed. – New York: McGraw Hill, 2008. – 1352 p.
8. **Sisle M.E., McCarthy E.D.** Hardware-in-the-loop simulation for an active missile // Simulation. – 1982. – Vol. 39, iss. 5. – P. 159–167.
9. Hardware-in-the-loop simulation system of Beijing simulation center / X. Chen, Z. Jiang, D. Wang, W. Zhang // Proceedings of the SPIE. – 1998. – Vol. 3368: Technologies for Synthetic Environments: Hardware-in-the-Loop Testing III (13 July 1998). – DOI: 10.1117/12.316373.
10. RF target and decoy simulator / D. Wayne, A. Tellakula, G. Cawthon, J. Langston, C. Pinson, M. Awadalla // AMTA 2011 Proceedings. – Englewood, US, 2011. – P. 485–490.
11. **Wayne D., McBride S., McKenna J.** Multiple target, dynamic RF scene generator // AMTA 2016 Proceedings. – Austin, TX, 2016. – P. 319–324.
12. **Анфиногенов А.Ю., Школьный Л.А.** Моделирование радиолокационных портретов распределенных объектов сложной формы // Радиотехника. – 2000. – № 3. – С. 64–68.
13. **Леонов А.И., Фомичев К.И.** Моноимпульсная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1984. – 312 с.
14. **Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A.** Principles of modern radar. Vol. 1. Basic principles. – Edison: Scitech, 2010. – 960 p.
15. **Выгодский М.Я.** Справочник по высшей математике. – М.: АСТ: Астрель, 2008. – 991 с.
16. Patent № 6950057 US. Complex radar target simulator / Mussell P., Fletcher M. – Date of Patent 27.09.2005.

SUBSTITUTION OF A DISTRIBUTED RADAR OBJECT WITH A SINGLE-POINT MODEL

Artyushenko V.V., Kiselev A.V., Tayurov A.V.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The article discusses a method for simulating extended radar objects distributed along angular coordinates, based on replacing the object with a point, the coordinates of which correspond to the apparent position of the object at any specific time. A matrix simulator is considered as simulation facilities. For considered simulation method an initial data on a modeling object are the distribution functions over the volume of the object of the correlation function of the same and oppo-

site quadrature components of the complex envelope of echo signals from elementary reflectors of the object. Analytical relations are given that determine a position of the object apparent center of radiation and the parameters of the signals supplied to the matrix emitters at any specific time in the simulation interval. The modeling adequacy is estimated by the correlation function and the distribution function of the apparent center of object radiation position. The accuracy of the proposed simulation method is confirmed by the results of numerical modeling of angular noise using the example of the classical multi-point model of a typical distributed object and its replacement «wandering point» formed by the simplest four-point matrix simulator. These results can be used for the synthesis of mathematical models used for developing hardware-software systems for the semi-realistic simulation of electromagnetic fields reflected from distributed objects.

Keywords: simulation of a complex radar target, apparent center of radiation, reflections from distributed objects, matrix simulator.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-1-14-24

REFERENCES

1. Kanashchenkov A.I., Merkulov V.I. *Radiolokatsionnye sistemy mnogofunktsional'nykh samoletov*. T. 1. *RLS – informatsionnaya osnova boevykh deistvii mnogofunktsional'nykh samoletov. Sistemy i algoritmy pervichnoi obrabotki radiolokatsionnykh signalov* [Multifunctional aircraft radar systems. Vol. 1. The radar is the information basis for the combat operations of multifunctional aircraft. Systems and algorithms for the initial processing of radar signals]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006. 656 p.
2. Tverskoi G.N., Terent'ev G.K, Kharchenko I.P. *Imitatory ekho-signalov sudovykh radiolokatsionnykh stantsii* [Echo shipboard radar simulators]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1973. 224 p.
3. He W., Zhang L., Li N. A new method to improve precision of target position in RFSS. *2007 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, Guilin, China, 2007, pp. 1-3. DOI: 10.1109/ICMMT.2007.381335.
4. Ostrovityanov R.V., Basalov F.A. *Statisticheskaya teoriya radiolokatsii protyazhennykh tselei* [Statistical theory of extended objectives radar]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 232 p.
5. Delano R. Teoriya "mertsaniya" tseli i uglovye oshibki pri radiolokatsionnom soprovozhdenii [Theory of glitter and angular errors during the radar tracking]. *Voprosy radiolokatsionnoi tekhniki = Problems of Radar Engineering*, 1954, no. 1 (19), pp. 108–119. (In Russian).
6. Davidovich I.V., Zhukovskii A.P. Opisanie signala, otrazhennogo ot protyazhennoi statisticheski nerovnoi poverkhnosti, s pomoshch'yu modeli zerkal'nykh tochek [Description of the signal reflected from an extended statistically uneven surface using a model of specular points]. *Sbornik nauchnykh trudov MEI* [Colltction of scientific works of MPEI]. Moscow, 1987, vol. 126, pp. 22–26.
7. Skolnik M.I. *Radar handbook*. 3rd ed. New York, McGraw Hill, 2008. 1352 p.
8. Sisle M.E., McCarthy E.D. Hardware-in-the-loop simulation for an active missile. *Simulation*, 1982, vol. 39, iss. 5, pp. 159–167.
9. Chen X., Jiang Z., Wang D., Zhang W. Hardware-in-the-loop simulation system of Beijing simulation center. *Proceedings of the SPIE*, 1998, vol. 3368. DOI: 10.1117/12.316373.
10. Wayne D., Tellakula A., Cawthon G., Langston J., Pinson C., Awadalla M. RF target and decoy simulator. *AMTA 2011 Proceedings*, Englewood, US, 2011, p. A11-0133.
11. Wayne D., McBride S., McKenna J. Multiple target, dynamic RF scene generator. *AMTA 2016 Proceedings*, Austin, TX, 2016, pp. 319–324.
12. Anfinogenov A.Yu., Shkol'nyi L.A. Modelirovanie radiolokatsionnykh portretov raspredelennykh ob"ektov slozhnoi formy [Modeling radar portraits of complex shape distributed objects]. *Radiotekhnika = Radioengineering*, 2000, no. 3, pp. 64–68.
13. Leonov A.I., Fomichev K.I. *Monoimpul'snaya radiolokatsiya* [Monopulse radar]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1984. 312 p.
14. Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A. *Principles of modern radar*. Vol. 1. *Basic principles*. Edison, Scitech, 2010. 960 p.

15. Vygodskii M.Ya. *Spravochnik po vysshei matematike* [Handbook of higher mathematics]. Moscow, AST Publ., Astrel' Publ., 2008. 991 p.
16. Mussell P., Fletcher M. *Complex radar target simulator*. Patent US, no. 6950057, 2005.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Артюшенко Вадим Валерьевич – родился в 1992 году, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: математическое моделирование, имитация радиотехнических сигналов. Опубликовано более 20 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: artushenkomail@mail.ru).

Artyushenko Vadim Valeryevich (b. 1992) – Candidate of Science (Eng.), Assistant Professor at the Department of Radio receiving and Radio transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on mathematical simulation and radio signal simulation. He is author more 20 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: artushenkomail@mail.ru).



Киселев Алексей Васильевич – родился в 1958 году, д-р техн. наук, профессор кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: имитационное моделирование сложной радиоэлектронной обстановки, радиолокация, радиосвязь. Имеет более 160 публикаций. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: nil_rtu@ngs.ru).

Kiselev Alexey Vasilevich (b. 1958) – Doctor of Sciences (Eng.), a professor at the Department of Radio receiving and Radio transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on simulation of complex electronic environment, radar detecting and ranging, and radio communication. He is author more 150 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: nil_rtu@ngs.ru).



Таюров 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 три научные работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: ya.antoha.rt@gmail.com).

Tayupov 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 3 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: ya.antoha.rt@gmail.com).

Статья поступила 06 ноября 2021 г.
Received November 06, 2021

To Reference:

Artyushenko V.V., Kiselev A.V., Tayurov A.V. Zameshchenie raspredelennogo radiolokatsionnogo ob"ekta odnotochechnoi model'yu [Substitution of a distributed radar object with a single-point model]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2022, no. 1 (54), pp. 14–24. DOI: 10.17212/1727-2769-2022-1-14-24.