

УДК: 621.396.01

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ФАЗОВАЯ ФОКУСИРОВКА ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ
МАТРИЧНОГО ИМИТАТОРА НА ДВЕ ТОЧКИ ПРИЕМА****Т.И. Сабитов***Новосибирский государственный технический университет*

В данной работе рассматриваются вопросы построения конфигурации когерентного матричного имитатора для моделирования экосигналов двухпозиционной системы. Сформулировано условие синфазности излучаемых сигналов в обеих точках приема в виде системы уравнений. Матрица, удовлетворяющая этому условию, обеспечивает имитацию цели в одном и том же положении для двух разнесенных антенн. Для обеспечения синфазности предложено использовать возможности размещения излучателей и управления начальными фазами сигналов. Получены соотношения для расчета координат излучателей двухточечной конфигурации и для расчета значения фазовой добавки. На основе этих соотношений разработан алгоритм синтеза расширенной одномерной матрицы с требуемым угловым размером. Показано, что точки такой матрицы могут быть расположены на одной прямой. Полученный алгоритм использован для синтеза конфигурации из семи излучателей для задаваемых параметров двухпозиционной системы. С помощью численных экспериментов произведена проверка адекватности модели. Задавались различные положения точечной цели, а для ее пеленга использовалась модель моноимпульсного пеленгатора. Результаты численных экспериментов подтверждают достоверность полученных теоретических результатов. Они могут быть использованы при математическом и имитационном моделировании отражений от реальных радиолокационных целей для двухпозиционных систем.

Ключевые слова: матричный имитатор, двухпозиционная система, моделирование.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-60-67

Введение

На сегодняшний день довольно подробно изучены вопросы имитации отражений электромагнитных волн от реальных объектов. Известные результаты [1–4] находят применение в полунатурном моделировании сигнально-помеховой обстановки, что позволяет осуществлять настройку и проверку качества работы радиолокационных систем (РЛС) в лабораторных условиях. Это значительно удешевляет и ускоряет процесс тестирования системы в сравнении с натурными испытаниями.

Для моделирования экосигналов от радиолокационных целей используют имитаторы. Наибольшее распространение получили матричные имитаторы (МИ) [1–3] в силу своих преимуществ: с их помощью на апертуре антенны исследуемой РЛС воспроизводится фронт электромагнитной волны, соответствующий отражениям от реальных объектов. При этом обеспечивается моделирование плавных перемещений цели с требуемой скоростью по заданной траектории.

В основе работы МИ используется то, что неразрешаемые антенной излучатели воспринимаются как одиночный источник – кажущийся центр излучения (КЦИ). КЦИ замещает точечную цель или отражатель многоточечного распределенного объекта. Положение КЦИ зависит от фаз и амплитуд излучаемых сигналов, приведенных в точку приема. Для двухточечной конфигурации [5]

$$\Delta\xi = (z_0^2 - 1) / (1 + 2z_0 \cos \psi + z_0^2), \quad (1)$$

где $z_0 = E_2 / E_1$ – отношение амплитуд сигналов; ψ – разность фаз; $\Delta\xi$ – нормированная координата КЦИ – отношение отклонения КЦИ от центра конфигурации к половине ее размера.

В работе [6] были исследованы вопросы достоверности моделирования эхосигналов матричными имитаторами. Установлено, что имеют место ошибки моделирования, обусловленные замещением точечного отражателя группой излучателей. Эти ошибки выражаются в отклонении КЦИ от задаваемого положения. Показано, что наименьшими ошибками моделирования обладают синфазные конфигурации излучателей ($\psi = 0$).

Для обеспечения синфазности сигналов излучатели располагают равноудаленно от точки приема. Однако если излучателей матрицы больше двух, то их располагают на одной прямой, а синфазности добиваются путем управления фазами подводимых к излучателям сигналов.

Известные конфигурации когерентных МИ разработаны для одноантенных систем. Для многопозиционных систем излучатели надо сфокусировать на все точки приема. А именно расположить так, чтобы разность фаз сигналов для всех точек приема была равна нулю. При этом имитируемая точечная цель будет наблюдаться в одном и том же положении для всех антенн.

В работах [7, 8] исследованы вопросы пространственной фокусировки одномерных и двумерных конфигураций на две точки приема. Результаты этих работ позволяют рассчитать координаты излучателей расширенных N -точечных матриц с требуемым угловым размером, обеспечивающих имитацию точечной цели в одном и том же положении для обеих антенн. Однако при этом точки излучения одномерной матрицы не могут быть расположены на одной прямой, а двумерной – в одной плоскости, что усложняет их практическую реализацию.

В данной работе предлагается рассмотреть возможности фокусировки матрицы излучателей на две точки приема, используя не только возможность управления взаимным расположением излучателей, но и возможность управления фазами сигналов. Данную фокусировку будем называть пространственно-фазовой. Предполагается, что это позволит синтезировать N -точечные матрицы излучателей, лежащих на одной прямой.

Цель работы – получить соотношения для расчета координат излучателей и значений фазовых добавок, для которых обеспечивается синфазность сигналов в двух точках приема.

1. Теория

Рассмотрим произвольную двухточечную конфигурацию (рис. 1). Запишем условие синфазности сигналов в двух точках приема:

$$\begin{cases} \Delta\phi_2 + \frac{2\pi}{\lambda}(R_{1A} - R_{2A}) = 2\pi k_1, \\ \Delta\phi_2 + \frac{2\pi}{\lambda}(R_{1B} - R_{2B}) = 2\pi k_2, \end{cases} \quad (2)$$

где $\Delta\phi_2$ – фазовая добавка к сигналу второго излучателя; R_{it} – расстояние между i -м излучателем и t -й антенной; λ – длина волны; k_1 и k_2 – целые числа.

Разность уравнений системы (2) после преобразований имеет вид

$$R_{1A} - R_{2A} - R_{1B} + R_{2B} = n\lambda, \quad (3)$$

где $n = k_1 - k_2$ – целое число.

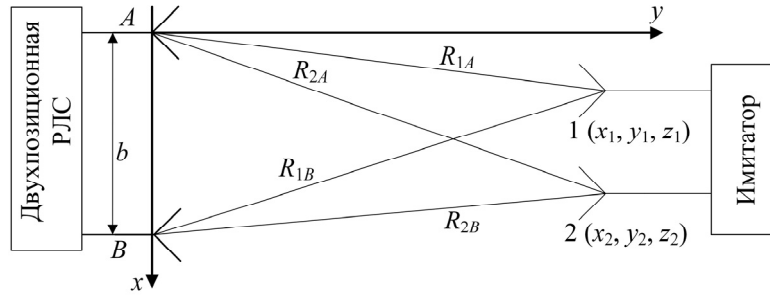


Рис. 1 – Матрица из двух излучателей применительно к двухпозиционной системе:

A, B – приемные антенны; 1, 2 – номера излучателей; b – расстояние между антеннами;
 R_{it} – расстояние между i -м излучателем и t -й антенной

Fig. 1 – A matrix of two radiators as applied to a two-position system:

A, B are receiving antennas; 1, 2 are the numbers of the radiators; b is the distance between the antennas; R_{it} is the distance between the i -th emitter and the t -th antenna

Запишем соотношение (3) с учетом введенной системы координат, связанной с антенной A :

$$\sqrt{(x_2 - b)^2 + y_2^2} - \sqrt{x_2^2 + y_2^2} = \sqrt{(x_1 - b)^2 + y_1^2} - \sqrt{x_1^2 + y_1^2} + n\lambda. \quad (4)$$

Пусть координаты первого излучателя заданы, и излучатели должны быть расположены на одной прямой $y_1 = y_2 = y$. Тогда правая часть уравнения может быть рассчитана отдельно как $F = f(x_1, y, n, b, \lambda)$, и (4) имеет вид

$$\sqrt{(x_2 - b)^2 + y^2} - \sqrt{x_2^2 + y^2} = F. \quad (5)$$

Решим (5) относительно абсциссы второго излучателя. Сделаем замену $x_2 = x'_2 + b/2$ и подставим ее в (5):

$$\begin{aligned} \sqrt{(x'_2 - b/2)^2 + y^2} &= \sqrt{(x'_2 + b/2)^2 + y^2} + F, \\ -2bx'_2 - F^2 &= 2F\sqrt{(x'_2 + b/2)^2 + y^2}, \\ 4(b^2 - F^2)x'^2_2 &= F^2b^2 + 4F^2y^2 - F^4, \\ x'_2 &= \pm \frac{F}{2} \sqrt{1 + \frac{4y^2}{b^2 - F^2}}. \end{aligned}$$

Делаем обратную замену:

$$x_2 = \pm \frac{F}{2} \sqrt{1 + \frac{4y^2}{b^2 - F^2}} + \frac{b}{2}. \quad (6)$$

Найденное соотношение позволяет ограничиться случаем симметричной конфигурации. Действительно, при $x_1 = b/2$ значения x_2 оказываются симметричными относительно $b/2$, и (6) преобразуется к виду

$$x_2 = \frac{b}{2} \pm \frac{n\lambda}{2} \sqrt{1 + \frac{4y^2}{b^2 - n^2\lambda^2}}. \quad (7)$$

Соотношение для расчета фазовой добавки может быть получено из первого уравнения системы (2):

$$\Delta\varphi_2 = \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{x_1^2 + y^2} - \sqrt{x_2^2 + y^2} \right) \right] \bmod 2\pi, \quad (8)$$

где \bmod – операция взятия остатка от целочисленного деления.

Используя (7) и (8), можно предложить следующий алгоритм синтеза протяженной матрицы.

1. Задаются исходные данные: параметры системы b и λ , расстояние между матрицей и системой y , абсцисса первого излучателя $x_1 = b/2$.

2. Задается ориентировочная координата второго излучателя x_2' при условии $x_2' \leq x_1 + y \operatorname{tg}(\alpha/2)$, где α – ширина ДНА по уровню половинной мощности.

3. Из (4) рассчитывается значение n , которое округляется до целого. С помощью (7) уточняется координата второго излучателя x_2 .

4. Найденная координата второго излучателя становится исходной для расчета координаты следующего, третьего излучателя в соответствии с пунктами 2 и 3.

5. Пункты со 2 по 4 циклично повторяются, пока не будет найдена точка расположения крайнего правого излучателя.

6. Найденные точки отображаются относительно оси симметрии матрицы $x_1 = b/2$.

7. С помощью (8) рассчитывается фазовая добавка $(i+1)$ -го излучателя относительно фазы i -го.

В качестве примера синтезируем матрицу для имитации цели в диапазоне $x_{\text{КЦИ}} \in [-1; 2]$ для $b = 1$ м, $\lambda = 0,03$ м. Первый излучатель располагаем в плоскости симметрии с координатами $(x_1, y_1) = (0,5; 5)$ м. Используя алгоритм, размещаем излучатели один за другим с шагом $\Delta x = 0,5$ м. Результаты применения алгоритма сведены в таблицу.

Координаты излучателей 7-точечной матрицы и значения фазовых добавок
The coordinates of the radiators of the 7-point matrix and the values of phase additives

Номер излучателя	Координаты $(x; y)$, м	Значение n	$\Delta\varphi$, град
4'	(-0,909;5)	–	–
3'	(-0,419;5)	–	51,86
2'	(0,046;5)	–	208,134
1	(0,5; 5)	–3	63,278
2	(0,954;5)	–3	296,722
3	(1,419;5)	–3	151,866
4	(1,909; 5)	–	308,14

2. Апробация результатов

Апробация результатов осуществлялась с помощью численных экспериментов. Задавались перемещения цели в диапазоне $x_{\text{КЦИ}} = [-0,9; 1,9]$ м. Если координата КЦИ удовлетворяла условию: $x_i \leq x_{\text{КЦИ}} \leq x_{i+1}$, то для этой пары излучателей рассчитывалась нормированная координата КЦИ:

$$\Delta\xi = \frac{2x_{\text{КЦИ}} - (x_{i+1} + x_i)}{x_{i+1} - x_i}.$$

По значению $\Delta\xi$ определялось отношению амплитуд сигналов с помощью (1) при условии, что $\psi = 0$.

Комплексные амплитуды сигналов i -х излучателей в t -й точке приема определялись соотношением

$$\dot{E}_{it} = E_i \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} R_{it} + \Delta\varphi_i \right].$$

Положение КЦИ, наблюдаемого из точек A и B , определялось с помощью модели моноимпульсного пеленгатора [9]:

$$F(i) = \operatorname{Re} \left(\frac{\Delta(i)}{\Sigma(i)} \right),$$

где $\Delta(i)$ – i -й отсчет сигнала, принятого моделью разностной диаграммой направленности пеленгатора; $\Sigma(i)$ – i -й отсчет сигнала, принятого моделью суммарной диаграммой направленности пеленгатора.

Результаты численных экспериментов представлены на рис. 2.

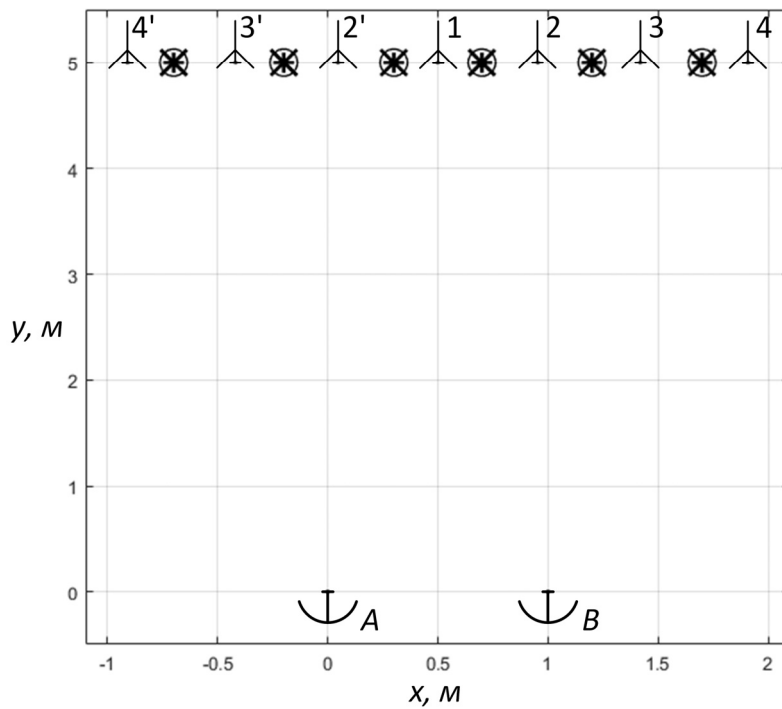


Рис. 2 – Результаты численных экспериментов:

× – цель, наблюдаемая антенной A ; + – цель, наблюдаемая антенной B ;
○ – задаваемые положения цели

Fig. 1 – Results of numerical experiments:

× is the target observed by the antenna A ; + is the target observed by the antenna B ;
○ is the required target positions

Видим, что обе антенны наблюдают цель в одних и тех же задаваемых положениях, что подтверждает достоверность полученных результатов.

Заключение

Показано, что возможность управления фазами излучаемых сигналов предоставляет дополнительную степень свободы при размещении излучателей.

В частности, она позволяет разместить излучатели матрицы на одной прямой, что существенно упрощает ее реализацию.

Найдены соотношения для расчета таких матриц.

Достоверность полученных соотношений подтверждена с помощью численных экспериментов.

Полученные результаты могут быть использованы в разработке матричных имитаторов эхосигналов двухпозиционных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Analysis and correction of triad field angle error in array radio frequency simulation / L. Hua, Z. Jianjiang, P. Minghai, Z. Hanwu // *Future Communication, Computing, Control and Management*. – 2012. – Vol. 2. – P. 125–134.
2. **Sisle M., McCarthy E.** Hardware-in-the-loop simulation for an active missile // *Simulation*. – 1982. – Vol. 39. – P. 159–167.
3. **Подкопаев А.О., Степанов М.А.** Синтез двухточечной частично когерентной модели, обеспечивающей заданные корреляционные характеристики угловых шумов, на основе ее эквивалентности трехточечной некогерентной модели с разделимостью пространственной и временной координат // *Вопросы радиоэлектроники*. – 2019. – Вып. 4. – С. 16–21.
4. **Мельник А.Ю.** Радиолокационные методы исследования Земли. – М.: Советское радио, 1980. – 264 с.
5. **Островитянов Р.В., Басалов Ф.А.** Статистическая теория радиолокации протяженных целей. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.
6. **Тырыкин С.В., Киселев А.В.** Адекватность моделирования матричным имитатором электромагнитных полей, рассеянных точечной радиолокационной целью // *Излучение и рассеяние электромагнитных волн: материалы всероссийской научно-технической конференции*. – Таганрог, 2001. – С. 27–31.
7. **Сабитов Т.И., Киселев А.В.** Имитация эхосигналов двухпозиционных систем с использованием когерентных излучателей // *Вопросы радиоэлектроники*. – 2019. – Вып. 4. – С. 42–46.
8. **Sabitov T.I., Kiselev A.V., Stepanov M.A.** Simulating an object's altitude for two-position systems // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. – 2020. – Vol. 59, N 2. – P. 217–222.
9. **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.

SPATIAL-PHASE FOCUSING OF MATRIX SIMULATOR RADIATORS AT TWO RECEIVING POINTS

Sabitov T.I.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

This paper discusses the issues of constructing the configuration of a coherent matrix simulator for modeling echo signals of a two-position system. The condition is formulated in the form of a system of equations that the emitted signals are in-phase at both points of reception. A matrix satisfying this condition provides a simulation of a target in the same position for two spaced

antennas. To ensure in-phase operation, it is proposed to use the possibilities of placing the radiators and controlling the initial phases of the signals. Relations are obtained for calculating the coordinates of the 2-point configuration and for calculating the phase addition value. Based on these relations, an algorithm for the synthesis of an extended one-dimensional matrix with the required angular size is developed. It is shown that the points of such a matrix can be located on one straight line. The obtained algorithm was used to synthesize a configuration of seven emitters for the given parameters of the two-position system. Using numerical experiments, the adequacy of the model was verified. Different positions of the point target were set, and a monopulse direction finder model was used to find its direction. The results of numerical experiments confirm the reliability of the theoretical results. They can be used in mathematical and simulation modeling of reflections from real radar targets for two-position systems.

Keywords: matrix simulator, two-position radar system, simulation.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-60-67

REFERENCES

1. Hua L., Jianjiang Z., Minghai P., Hanwu Z. Analysis and correction of triad field angle error in array radio frequency simulation. *Future Communication, Computing, Control and Management*, 2012, vol. 2, pp. 125–134. DOI: 10.1007/978-3-642-27314-8_18.
2. Sisle M., McCarthy E. Hardware-in-the-loop simulation for an active missile. *Simulation*, 1982, vol. 39, pp. 159–167. DOI: 10.1177/003754978203900503.
3. Podkopaev A.O., Stepanov M.A. Sintez dvukhtochechnoi chastichno kogerentnoi modeli, obespechivayushchei zadannye korrelyatsionnye kharakteristiki uglovykh shumov, na osnove ee ekvivalentnosti trekhtochechnoi nekogerentnoi modeli s razdelimost'yu prostranstvennoi i vremennoi koordinat [Synthesis of two-point partially coherent model, providing specified correlation characteristics of angular noise, based on its equivalence of three-point non-coherent model with separability of spatial and temporal coordinates]. *Voprosy radioelektroniki = Issues of radioelectronics*, 2019, iss. 4, pp. 16–21.
4. Mel'nik A.Yu. *Radiolokatsionnye metody issledovaniya Zemli* [Earth exploration radar methods]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1980. 264 p.
5. Ostrovityanov R.V., Basalov F.A. *Statisticheskaya teoriya radiolokatsii protyazhennykh tselei* [Statistical theory of extended radar targets]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 232 p.
6. Tyrykin S.V., Kiselev A.V. [Adequacy of modeling by a matrix simulator of electromagnetic fields scattered by a point radar target]. *Izluchenie i rasseyanie elektromagnitnykh voln: materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnikeskoi konfe-rentsii* [Proceedings of the All-Russian conference "Radiation and scattering of electromagnetic waves"], Taganrog, 2001, pp. 27–31. (In Russian).
7. Sabitov T.I., Kiselev A.V. Imitatsiya ekhsignalov dvukhpozitsionnykh sistem s ispol'zovaniem kogerentnykh izluchatelei [Simulation of echo signals of two-position systems using coherent emitters]. *Voprosy radioelektroniki = Issues of radioelectronics*, 2019, iss. 4, pp. 42–46.
8. Sabitov T.I., Kiselev A.V., Stepanov M.A. Simulating an object's altitude for two-position systems. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2020, vol. 59, no. 2, pp. 217–222.
9. 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* [Radar systems multipurpose aircraft. Vol. 1. Radar – information basis hostilities multipurpose aircraft. Systems and algorithms for primary processing of radar signals]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006. 656 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Сабитов Тимур Ильясович – родился в 1996 году, магистрант, кафедра радиоприемных и радиопередающих устройств, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: радиолокация, имитационное моделирование. Опубликовано 6 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: sti0@mail.ru).

Sabitov Timur Il'iasovich (b. 1996) – a graduate student at the department of radio receivers and radio transmitters, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on radiolocation and simulation modeling. He is author of 6 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sti0@mail.ru).

*Статья поступила 19 мая 2020 г.
Received May 19, 2020*

To Reference:

Sabitov T.I. Prostranstvenno-fazovaya fokusirovka izluchatelei matrichnogo imitatora na dve tochki priema [Spatial-phase focusing of matrix simulator radiators at two receiving points]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 1–2 (46–47), pp. 60–67. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-60-67.