

Т. И. Сабитов<sup>1</sup>, А. В. Киселев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет

# ИМИТАЦИЯ ЭХОСИГНАЛОВ ДВУХПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЦЫ ИЗ ПЯТИ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

*Рассмотрена актуальная задача моделирования эхосигналов радиолокационных систем, использующих две приемные антенны с разнесенными фазовыми центрами и перекрывающимися диаграммами направленности. Для ее решения предложено использовать матрицу из пяти излучателей. Конфигурация матрицы построена на основе результатов предшествующей работы авторов и отвечает условиям компенсации и ортогональности сигналов. При этом независимая имитация целей для каждой из антенн осуществляется двумя парами излучателей, в то время как пятый введен для осуществления взаимной компенсации сигналов. Условие ортогональности выполняется за счет конфигурирования точек излучения. Получены соотношения для расчета координат точек излучения. Предложен алгоритм синтеза матрицы. Показано, что излучатели могут быть расположены на одной прямой. В качестве примера выполнен синтез матрицы для заданных исходных данных. Осуществлена ее апробация методами численного моделирования. Результаты эксперимента подтвердили справедливость найденных соотношений.*

**Ключевые слова:** моделирование, двухпозиционная система, независимая имитация, матричный имитатор

## Введение

При разработке и тестировании современных радиолокационных систем (РЛС) прибегают к полунатурному моделированию реальной сигнально-помеховой обстановки в лабораторных условиях [1–4]. Это позволяет в значительной степени сократить материальные расходы и время. Применительно к РЛС для решения задач моделирования используют матричные имитаторы (МИ). Они представляют собой систему жестко закрепленных излучателей. К ним подводят имитируемые эхосигналы от цели или помехи. При этом в точке приема (точке расположения фазового центра антенны исследуемой РЛС) формируются электромагнитные волны, вектор нормали к фазовому фронту которых указывает угловое положение имитируемой цели (точнее, указывает угловое положение так называемого кажущегося центра излучения КЦИ). Управление положением КЦИ осуществляется путем настройки характеристик сигналов, подводимых к излучателям. Например, для двухточечной матрицы [5]:

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

где  $\xi$  – отклонение положения КЦИ от геометрического центра матрицы, нормированное к половине расстояния между излучателями,  $z = E_2/E_1$  и  $\psi$  – отношение амплитуд и разность фаз сигналов

излучателей, приведенные в точку приема, соответственно.

Наибольшая достоверность имитации имеет место в случае синфазности сигналов, т.е. при  $\psi = 0$ . При этом излучатели МИ обычно располагают равноудаленно от фазового центра приемной антенны исследуемой РЛС. Однако такое расположение невозможно в случае моделирования сигналов РЛС, использующей несколько разнесенных антенн (например, корреляционных измерителей скорости и сноса и др. [6, 7]).

В работах [8, 9] рассмотрены вопросы конфигурирования матрицы таким образом, чтобы обеспечивалась синфазность сигналов в двух точках приема. Это позволяет устанавливать общий КЦИ для двух антенн РЛС с перекрывающимися диаграммами направленности. Вместе с тем большой интерес представляет решение, обеспечивающее раздельное, независимое управление угловыми положениями имитируемых целей для обеих антенн. В данной работе рассматривается матрица из пяти излучателей, решающая эту задачу.

Цель работы – обосновать методы синтеза матрицы, обеспечивающей независимое управление угловым положением имитируемых целей для радиолокационных систем, использующих две приемные антенны с разнесенными фазовыми центрами и перекрывающимися диаграммами направленности.

**Обоснование метода синтеза матрицы**

Ранее авторами была рассмотрена произвольная  $N$ -точечная конфигурация излучателей МИ применительно к однопозиционной системе [8]. Решалась задача управления положением имитируемой цели только парой излучателей из  $N$ , равноудаленных от точки приема (обозначим их № 1 и 2). Установлено, что для исключения влияния сигналов остальных излучателей должны быть выполнены следующие условия:

- условие компенсации сигналов  $\sum_{i=3}^N E_i \cos \varphi_i = 0$ ,  
 $\sum_{i=3}^N E_i \sin \varphi_i = 0$ ;
- условие ортогональности сигналов  $\varphi - \varphi_i = \pi/2$ ,

где  $\varphi = \varphi_1 = \varphi_2$  – фаза сигналов 1-го и 2-го излучателей;  $E_i, \varphi_i$  – амплитуда и фаза сигнала  $i$ -го излучателя,  $i = \{3, 4, \dots, N\}$ . Здесь и далее по умолчанию понимаются амплитуды и фазы, приведенные в точку приема, в которой находится фазовый центр антенны РЛС.

С учетом этих условий предлагается следующая конфигурация излучателей МИ для двухпозиционной РЛС (рисунок). Излучатели расположены так, что  $R_{1A} = R_{4A}, R_{3A} = R_{5A}, R_{2B} = R_{5B}, R_{1B} = R_{3B}$ , где  $R_{ij}$  – расстояние между  $i$ -й точкой излучения и  $j$ -й антенной. На рисунке выполнение условий, накладываемых на  $R_{ij}$ , схематично отображено пунктирными линиями.

Используя требования компенсации и ортогональности, найдем условия, при выполнении которых излучатели № 1 и 4 работают как двухточечный МИ (формируют КЦИ) для антенны  $A$ , излучатели № 2 и 5 – для антенны  $B$ , а излучатель № 3 используется для выполнения условия компенсации. Для этого требуются следующие параметры сигналов:

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_4 = \varphi_5 = 0, E_3 = E_1 + E_4 = E_2 + E_5, \varphi_3 = \pi. \quad (2)$$

Найдем соотношения для расчета амплитуд сигналов, при которых будут обеспечиваться заданные положения КЦИ обеим антеннам, а также будут выполняться условия компенсации. Выражения для расчета нормированных координат КЦИ вытекают из (1) с учетом (2):

$$\xi_A = \frac{E_4 - E_1}{E_4 + E_1}, \xi_B = \frac{E_5 - E_2}{E_5 + E_2}. \quad (3)$$

Из (2) и (3) могут быть получены соотношения для расчета амплитуд сигналов, нормированных к амплитуде сигнала 1-го излучателя:

$$\gamma_2 = \frac{1 - \xi_B}{1 - \xi_A}, \gamma_3 = \frac{2}{1 - \xi_A}, \gamma_4 = \frac{1 + \xi_A}{1 - \xi_A}, \gamma_5 = \frac{1 + \xi_B}{1 - \xi_A}, \quad (4)$$

где  $\gamma_2 = E_2/E_1; \gamma_3 = E_3/E_1; \gamma_4 = E_4/E_1; \gamma_5 = E_5/E_1$ .

Условие ортогональности [8] накладывает требования на положение излучателей № 1, 2, 4 и 5. В системе координат, связанной с антенной  $A$ , сформулируем эти требования в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \sqrt{x_1^2 + l^2} - \sqrt{x_4^2 + l^2} = n_1 \lambda, \\ \sqrt{(x_1 - b)^2 + l^2} - \sqrt{(x_4 - b)^2 + l^2} = k_1 \lambda, \\ \sqrt{x_4^2 + l^2} - \sqrt{x_2^2 + l^2} = (2n_2 + 1)\lambda/4, \\ \sqrt{(x_4 - b)^2 + l^2} - \sqrt{(x_2 - b)^2 + l^2} = (2k_2 + 1)\lambda/4, \\ \sqrt{x_2^2 + l^2} - \sqrt{x_5^2 + l^2} = n_3 \lambda, \\ \sqrt{(x_2 - b)^2 + l^2} - \sqrt{(x_5 - b)^2 + l^2} = k_3 \lambda, \end{cases} \quad (5)$$

где  $x_i$  – координаты излучателей МИ по оси  $x$ ;  $n_i, k_i$  – целочисленные коэффициенты;  $\lambda$  – рабочая длина волны РЛС.

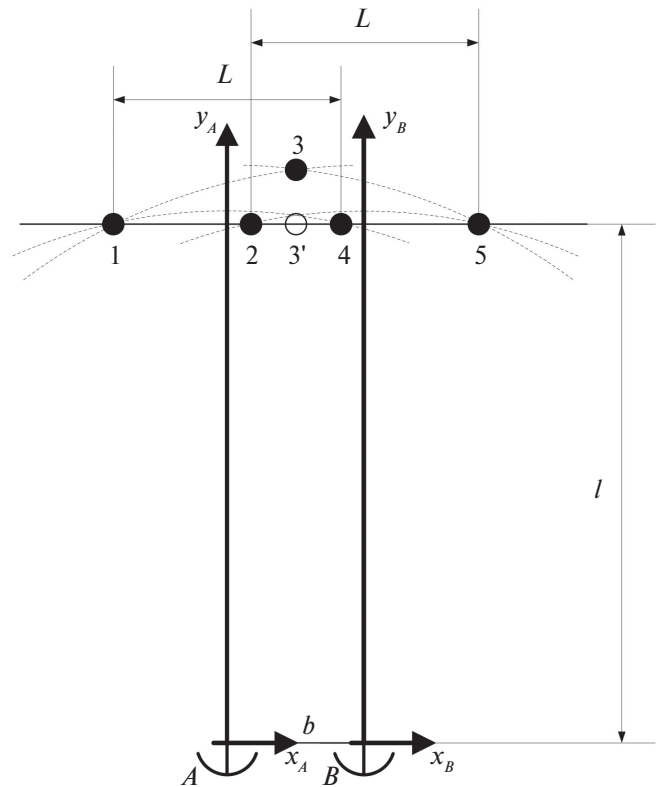


Рисунок. Пятиточечная конфигурация, обеспечивающая независимое управление положениями имитируемых целей: 1–5 – номера излучателей;  $b$  – база;  $L$  – расстояние между излучателями, формирующими положения кажущегося центра излучения;  $l$  – расстояние между матричным имитатором и линией возможного положения кажущегося центра излучения;  $A$  и  $B$  – приемные антенны радиолокационной системы

Первая пара уравнений системы (5) обеспечивает выполнение условия синфазности сигналов пары излучателей № 2 и 5 в точках *A* и *B*. Аналогичное условие для излучателей № 3 и 6 отражает третья пара уравнений. Вторая пара уравнений диктуется условием ортогональности.

С учетом симметрии МИ ( $x_1 + x_5 = b, x_2 + x_4 = b, x_1 = -x_4$ ) система (5) преобразуется к виду

$$\begin{cases} \sqrt{(x_2 - b)^2 + l^2} - \sqrt{(x_2 + b)^2 + l^2} = k_1 \lambda, \\ \sqrt{x_2^2 + l^2} - \sqrt{(x_2 + b)^2 + l^2} = (2n_2 + 1)\lambda/4. \end{cases} \quad (6)$$

Поиск решений системы (6) относительно  $x_2$  и  $l$  предлагается осуществлять с помощью следующего алгоритма:

1. Задаются исходные данные: параметры  $b$  и  $\lambda$ , а также ориентировочные значения  $x_2$  и  $l$  (обозначим их как  $x_2'$  и  $l'$ ).
2. Из (6) рассчитываются соответствующие  $n_2$  и  $k_1$ .
3. Значения  $n_2$  и  $k_1$  округляются до целочисленных. Численными методами из (6) определяются значения  $x_2$  и  $l$ .
4. С учетом симметрии МИ определяются координаты остальных излучателей.

Отметим, что компенсирующий излучатель № 3 расположен на оси симметрии матрицы. Это позволяет переместить его на линию расположения остальных излучателей, в позицию  $3'$  (рис.), что необходимо учесть в виде соответствующей фазовой добавки  $\Delta\varphi_3$ , которая может быть рассчитана по очевидной формуле:

$$\Delta\varphi_3 = -\frac{2\pi}{\lambda} \left( \sqrt{l^2 + \left(b + \frac{L}{2}\right)^2} - \sqrt{l^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right). \quad (7)$$

Рассмотрим возможности полученной матрицы.

Во-первых, она обеспечивает независимую имитацию целей для антенн *A* и *B* парами излучателей № 1 и 4 и № 2 и 5 соответственно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sisle M. E., McCarthy E. D. Hardware-in-the-loop simulation for an active missile // Simulation. 1982. Vol. 39. No. 5. P. 159–167.
2. Maples V. H., Eastman G. A., inventors; Boeing Aerospace Company, assignee. Radar scene simulator. US patent US4660041. 21.04.1987.
3. Антипов В. Ю., Метельников А. Ю., Токарев Е. Г. Метод и технология полунатурного моделирования бортовых радиосистем ближнего действия фазодоплеровского типа // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2016. № 1. С. 32–41.
4. Никулин А. В., Степанов М. А. Замещение распределенного объекта трехточечной геометрической моделью // Вопросы радиоэлектроники. 2014. № 2. С. 77–85.
5. Островитянов Р. В., Басалов Ф. А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. М.: Радио и связь, 1982. 232 с.
6. Иванов Ю. А. Комплексированная навигационная система на базе бесплатформенной инерциальной навигационной системы и корреляционного измерителя скорости и сноса // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2015. № 2. С. 74–81.
7. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / под ред. М. Н. Красильщикова и Г. Г. Себрякова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 280 с.

Во-вторых, может быть использована только одна пара излучателей для имитации общего КЦИ обеих антенн. Все остальные излучатели при этом должны быть выключены.

## Апробация результатов

Проверка полученных результатов осуществлялась методами численного моделирования. Были рассчитаны координаты излучателей 5-точечной матрицы со следующими данными:  $b = 1$  м,  $\lambda = 0,3$  см,  $x_1' = -1$  м и  $l' = 7$  м. В результате применения предложенного алгоритма получены значения:  $x_1 = -0,986$  м;  $x_2 = 0,014$  м;  $x_3 = 0,5$  м;  $x_4 = 0,986$  м;  $x_5 = 1,986$  м;  $l = 7,171$  м.

Для полученной матрицы независимо для каждой антенны задавались по три положения КЦИ: для антенны  $A x_{\text{КЦИ}A} = \{-0,7; -0,2; 0,7\}$  м, для антенны  $B x_{\text{КЦИ}B} = \{0,3; 1,2; 1,6\}$  м. Затем с помощью (2)–(4) и (7) рассчитывались комплексные амплитуды сигналов, приведенные в точки приема. Положения целей (точнее, положения КЦИ) для каждой из антенн определялись с помощью модели пеленгатора, использующей известное пеленгационное соотношение [10].

В результате численного эксперимента получены следующие результаты. Цель, наблюдаемая антенной *A*, имела координаты  $x_{A\text{mod}} = \{-0,7; -0,2; 0,7\}$  м, наблюдаемая антенной *B* –  $x_{B\text{mod}} = \{0,3; 1,2; 1,6\}$  м. Видно, что полученные результаты соответствуют заданным координатам, что подтверждает полученные соотношения и выводы.

## Заключение

Предложена структура и получены соотношения для синтеза матричных имитаторов, обеспечивающих независимое моделирование целей, визируемых РЛС, которая имеет две разнесенные приемные антенны с перекрывающимися или частично перекрывающимися диаграммами направленности. Полученные результаты подтверждены методами численного моделирования и могут быть использованы для разработки МИ эхосигналов двух антенных систем.

8. Сабитов Т. И., Киселев А. В. Имитация эхосигналов двухпозиционных систем с использованием когерентных излучателей // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 42–46.
9. Kiselev A. V., Sabitov T. I., Stepanov M. A. Simulating an object's altitude for two-position systems // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2020. Vol. 59. No. 2. P. 217–222.
10. 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.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Сабитов Тимур Ильясович**, магистрант, Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, д. 20, тел.: 8 (383) 346-15-46, e-mail: sti0@mail.ru.

**Киселев Алексей Васильевич**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой радиоприемных и радиопередающих устройств, Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, д. 20, тел.: 8 (383) 346-15-46, e-mail: nil\_rtu@ngs.ru.

*For citation: Sabitov T. I., Kiselev A. V. Simulation of echo signals of two-position radar station using matrix of five emitters. Issues of radio electronics, 2020, no. 5, pp. 6–9. DOI 10.21778/2218-5453-2020-5-6-9*

T. I. Sabitov, A. V. Kiselev

## SIMULATION OF ECHO SIGNALS OF TWO-POSITION RADAR STATION USING MATRIX OF FIVE EMITTERS

The problem of modeling the echo signals of radar systems which use two receiving antennas with spaced phase centers and overlapping beam patterns is considered. To solve it, it is proposed to use a matrix of five emitters. Its configuration is based on the results of the previous work of the authors and meets the conditions of compensation and orthogonality of signals. Independent simulation of targets for each antenna is carried out by two pairs of emitters, while the fifth one is introduced for phase compensation of signals. The orthogonality condition is met by configuring the radiation points. Relations are obtained for calculating the coordinates of the radiation points. It is shown that emitters can be located on one straight line. As an example, a matrix was synthesized for a given input data. It was tested by numerical simulation methods. The results of the experiment confirmed the validity of the results found.

**Keywords:** simulation, two-position system, independent simulation, matrix simulator

## REFERENCES

1. Sisle M. E., McCarthy E. D. Hardware-in-the-loop simulation for an active missile. *Simulation*, 1982, vol. 39, no. 5, pp. 159–167.
2. Maples V. H., Eastman G. A., inventors; Boeing Aerospace Company, assignee. Radar scene simulator. US patent US4660041. 21.04.1987.
3. Antipov V. Yu., Metelnikov A. Yu., Tokarev Ye. G. Semi-physical simulation method and technology for on-board phase-Doppler short-range radio systems. *Vestnik Kontserna VKO Almaz-Antey*, 2016, no. 1, pp. 32–41. (In Russian).
4. Nikulin A. V., Stepanov M. A. The substitution of a distributed radar object for the three-point model. *Issues of radio electronics*, 2014, no. 2, pp. 77–85. (In Russian).
5. Ostrovityanov R. V., Basalov F. A. *Statisticheskaya teoriya radiolokacii protyazhennyh celej* [The statistical theory of radar extended targets]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1982, 232 p. (In Russian).
6. Ivanov Y. A. Complexed navigation system based on a strapdown inertial navigation system and correlation meter speed and drift. *Vestnik Kontserna VKO Almaz-Antey*, 2015, no. 2, pp. 74–81. (In Russian).
7. Krasilshnikov M. N., Sebrjakova G. G., editors. *Upravlenie i navedenie bespilotnyh manevrennyh letatel'nyh apparatov na osnove sovremennyh informacionnyh tehnologij* [Control and guidance of unmanned maneuverable aircraft based on modern information technology]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2003, 280 p. (In Russian).
8. Sabitov T. I., Kiselev A. V. Simulation of echo signals of two-position systems using coherent emitters. *Issues of radio electronics*, 2019, no. 4, pp. 42–46. (In Russian).
9. Kiselev A. V., Sabitov T. I., 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.
10. Kanashchenkov A. I., Merkulov V. I. *Radiolokacionnye sistemy mnogofunkcionalnyh samoletov*. Vol. 1. RLS – informacionnaya osnova boevykh dejstvij mnogofunkcionalnyh samoletov. Sistemy i algoritmy pervichnoj obrabotki radiolokacionnyh signalov. [Radar as an informational basis for the combat operations of multifunctional aircraft. Systems and algorithms for primary processing of radar signals]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006, 656 p. (In Russian).

## AUTHORS

**Sabitov Timur**, undergraduate student, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, tel.: +7 (383) 346-15-46, e-mail: sti0@mail.ru.

**Kiselev Aleksey**, D. Sc., professor, head of the Department of radio receivers and radio transmitters, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, tel.: +7 (383) 346-15-46, e-mail: nil\_rtu@ngs.ru.