

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.10.14>

УДК: 621.396.96

## **ОШИБКИ ФАЗИРОВКИ МАТРИЧНОГО ИМИТАТОРА ЭХОСИГНАЛОВ МНОГОАНТЕННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

**М. А. Степанов, Т. И. Сабитов, А. В. Киселев**

**Новосибирский государственный технический университет  
630073, г. Новосибирск, пр-т. К. Маркса, д.20**

Статья поступила в редакцию 11 октября 2021 г.

**Аннотация.** Данная работа посвящена исследованию ошибок фазировки матричного имитатора, возникающих при калибровке сигналов излучателей, сфокусированных на несколько точек приема. Известна процедура компенсации фазовых ошибок, разработанная для матричных имитаторов, используемых для моделирования эхосигналов на одну приемную антенну. Она позволяет выровнять фазы сигналов имитатора и устранить ошибки моделирования, обусловленные нарушением фазировки. Показано, что применительно к многоантенным радиолокационным системам данная процедура не позволяет устранить ошибки фазировки одновременно для всех приемных антенн. Рассмотрен случай двухантенной системы и матрицы из двух излучателей. Для данного случая получено соотношение для расчета фазовой поправки, минимизирующее ошибку фазировки сигналов. При этом величина ошибки зависит от величины случайных смещений излучателей от требуемых положений. Для заданной точности позиционирования излучателей имитатора исследован наихудший случай, которому соответствует максимальная фазовая ошибка. Получены соотношения для оценки этой ошибки. На основе данных соотношений установлены пути её минимизации. Для большего числа излучателей получено соотношение для расчета максимально возможной

ошибки фазировки. Также полученные результаты могут быть распространены на случай большего числа приемных антенн. С целью проверки теоретических результатов разработана матрица из двух излучателей, сфокусированная на две точки приема. Осуществлен ряд численных экспериментов, результаты которых подтвердили достоверность полученных соотношений. Результаты данной работы практически значимы, так как определяют требования к конфигурации матричного имитатора по критерию достижимости требуемого уровня фазировки сигналов излучателей в точках приема. Они могут быть использованы при разработке матричных имитаторов эхосигналов многоантенных радиолокационных систем.

**Ключевые слова:** полунатурное моделирование, матричный имитатор, многоантенная радиолокационная система, ошибки моделирования, компенсация фазовых ошибок

**Abstract.** This work is devoted to the study of phasing errors of a matrix simulator focused on several receiving points. Errors arising during signal calibration are considered. The phase error compensation procedure is designed for matrix simulators used to simulate echoes for a single receive antenna. It allows to align the phases of the simulator signals and eliminate simulation errors caused by phase errors. It is shown that this procedure does not allow to eliminate phasing errors simultaneously for several receiving antennas. The case of a two-antenna system and a matrix of two emitters is considered. For this case, a relation was obtained for calculating the phase correction, which minimizes the phasing error of the signals. Herewith the magnitude of the error depends on the magnitude of the random displacements of the emitters from the required positions. For a given emitter positioning accuracy, the worst case is investigated, which corresponds to the maximum phase error. Relationships are obtained to estimate this error. On the basis of these relations, the ways of its minimization are established. For a larger number of emitters, a relation is obtained for calculating the maximum possible phasing error. The results obtained can be extended to the case of a larger number of receiving antennas. In order to verify the theoretical results a matrix of two emitters was developed focused on two receiving points. A

number of numerical experiments have been carried out, the results of which have confirmed the reliability of the obtained relationships. The results of this work are practically significant, since they determine the requirements for the configuration of the matrix simulator. They allow to determine whether the required phasing can be provided for a given matrix. They can be used in the development of matrix simulators of echo signals of multi-antenna radar systems.

**Key words:** ключевые слова через запятую на английском.

### **Введение.**

На различных этапах разработки радиолокационных систем (РЛС) применяют полунатурное моделирование [1-4]. С помощью имитаторов воссоздается сигнально-помеховая обстановка, соответствующая реальным условиям работы РЛС. Имитаторы позволяют осуществлять настройку и тестирование РЛС в лабораторных условиях, что значительно экономит материальные и временные ресурсы за счет сокращения объема натуральных испытаний. Наиболее широко используются матричные имитаторы (МИ) [5-8]. Они представляют собой матрицу излучателей, размеры которой не превышают размеры элемента разрешения. Сигналы излучателей МИ интерферируют в точке приема испытываемой РЛС, в результате чего они формируют сигнал так называемого кажущегося центра излучения (КЦИ). КЦИ имитирует точечную цель в некотором угловом положении. Координаты КЦИ зависят от амплитудно-фазовых соотношений сигналов МИ. В случае МИ из двух излучателей выражение для координаты КЦИ имеет вид [9]:

$$\Delta\xi = \frac{\Delta x}{L/2} = \frac{\operatorname{tg} \theta}{\alpha/2} = \frac{z_0^2 - 1}{1 + 2z_0 \cos \psi + z_0^2}, \quad (1)$$

где  $z_0 = E_2/E_1$  и  $\psi$  – отношение амплитуд и разность фаз сигналов в точке приема соответственно,  $\Delta x$  – линейное отклонение КЦИ от геометрического центра матрицы,  $L$  – расстояние между излучателями,  $\theta$  – угол между направлением на КЦИ и направлением на геометрический центр матрицы,  $\alpha$  – угловой размер матрицы.

На основе суперпозиции МИ позволяют имитировать несколько КЦИ, которые могут замещать несколько одиночных целей, групповую цель либо распределенный объект [10].

Такие эффекты как неидентичность коэффициентов передачи каналов МИ, неточное позиционирование излучателей, прогрев аппаратуры и многие другие приводят к нарушениям амплитудно-фазовых соотношений в точке приема. Это приводит к ошибкам моделирования, которые выражаются в смещении КЦИ от задаваемых положений. Для устранения ошибок моделирования предлагается процедура калибровки [11]. С помощью вспомогательной измерительной системы осуществляется оценка комплексных коэффициентов передачи каналов МИ. На основе данных оценок вводятся поправочные коэффициенты по амплитуде и фазе. Однако данная процедура компенсации фазовых ошибок МИ разработана применительно к имитации эхосигналов РЛС с одной приемной антенной.

Известны МИ, излучатели которых фокусируют на несколько точек приема для обеспечения возможности имитации радиолокационных отражений одновременной для нескольких приемных антенн с разнесенными фазовыми центрами [12, 13]. Например, в работе [12] представлены результаты по синтезу МИ, излучатели которого сфокусированы на две приемные антенны так, чтобы обеспечивалась имитация общего КЦИ, имеющего одно и то же положение для каждой приемной антенны.

В МИ эхосигналов многоантенных РЛС также имеют место ошибки фазировки. Однако компенсация фазовых ошибок с помощью процедуры, описанной выше, невозможна вследствие того, что каждой приемной антенне соответствуют свои фазовые поправки сигналов излучателей, которые не могут быть учтены одновременно. Данная работа направлена на исследование ошибок фазировки при адаптации процедуры калибровки для МИ эхосигналов многоантенных РЛС.

## 1. Компенсация фазовых ошибок

Рассмотрим конфигурацию из пары излучателей МИ, антенны измерительного приемника (ИП) системы калибровки и приемной антенны РЛС [11] (см рис. 1).

Сигналы имитатора задаются синфазными, однако величина разности фаз сигналов, принимаемых антенной ИП, не равна 0 рад. Величина ошибки разности фаз формируется из регулярной и случайной компонент:

$$\Delta\phi = [\Delta\phi_{\text{рег}} + \Delta\phi_{\text{сл}}] \bmod 2\pi, \quad (2)$$

где  $\bmod$  – операция взятия остатка от целочисленного деления для приведения фазы к диапазону  $[0; 2\pi)$ .

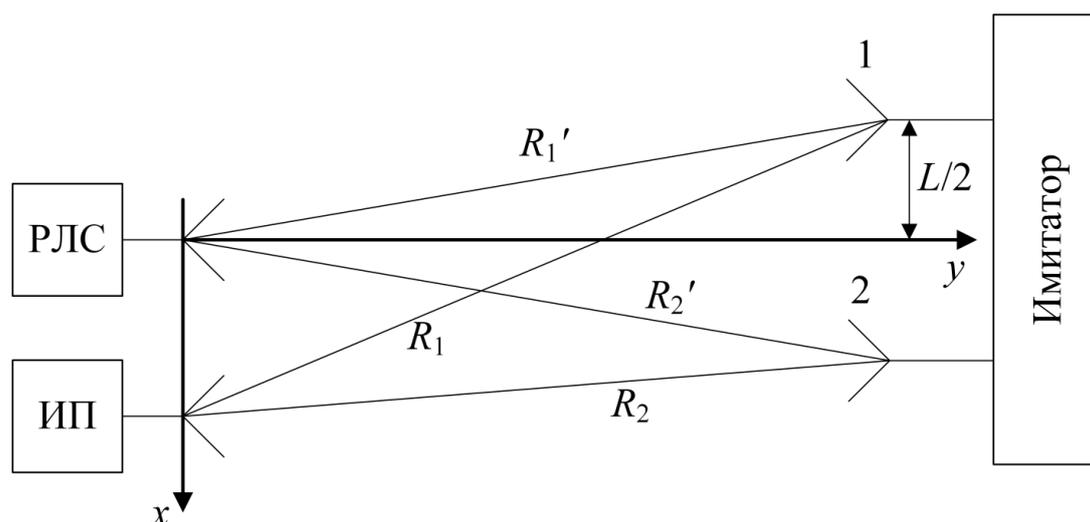


Рис. 1. Конфигурация системы калибровки.

Случайная компонента в (2) включает различные трудноучитываемые факторы, такие как неидентичность каналов формирования сигналов и т.д. Регулярная компонента в (2) обусловлена неэквидистантным расположением излучателей от точки приема (имеет место дополнительный набег фазы и). Она может быть рассчитана по формуле:

$$\Delta\phi_{\text{рег}} = \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (R_1 - R_2) \right] \bmod 2\pi, \quad (3)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – расстояния от 1 и 2 излучателей до антенны ИП (см. рис. 1).

Сигнал 1-го излучателя принимается за опорный, относительно его фазы вносится фазовая поправка (2) в сигнал 2-го излучателя. В результате достигается синфазность сигналов, принимаемых ИП. Так как антенны ИП и РЛС разнесены, то поправочный коэффициент (2) пересчитывается для точки приема РЛС:

$$\Delta\phi' = \left[ \Delta\phi + \frac{2\pi}{\lambda} (R'_1 - R'_2 - R_1 + R_2) \right] \text{mod } 2\pi \quad (4)$$

Длины путей, входящие в (4), рассчитываются через координаты точек излучения и координаты точек приема (см. рис. 1):

$$\begin{cases} R'_1 = \sqrt{(x_0 - L/2)^2 + y_0^2 + z_0^2}, \\ R'_2 = \sqrt{(x_0 + L/2)^2 + y_0^2 + z_0^2}, \\ R_1 = \sqrt{(x_0 - L/2 - x_{\text{ИП}})^2 + (y_0 - y_{\text{ИП}})^2 + (z_0 - z_{\text{ИП}})^2}, \\ R_2 = \sqrt{(x_0 + L/2 - x_{\text{ИП}})^2 + (y_0 - y_{\text{ИП}})^2 + (z_0 - z_{\text{ИП}})^2}. \end{cases}$$

где  $(x_0, y_0, z_0)$  – координаты центра двухточечной конфигурации имитатора.

Рассмотрим коррекцию фазовой ошибки применительно к матрице излучателей, сфокусированной на две точки приема (см. рис. 2).

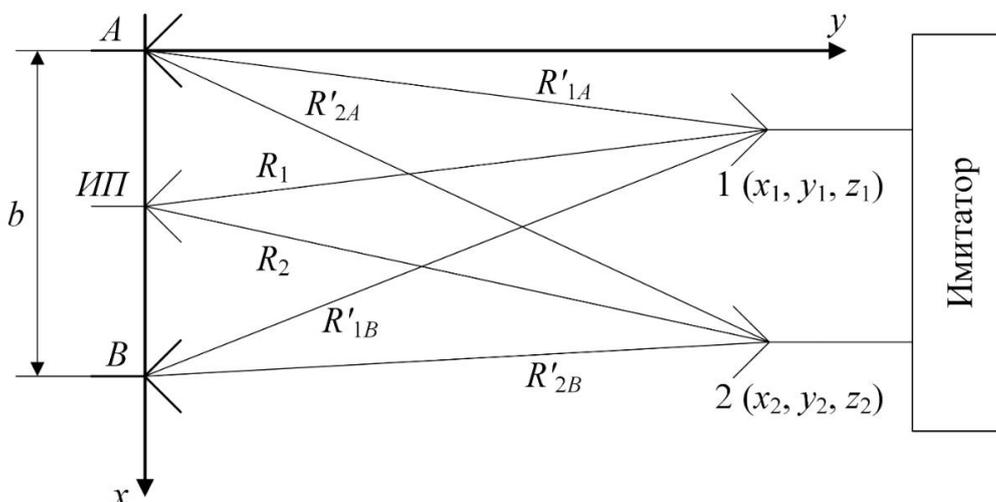


Рис. 2. Конфигурация системы калибровки МИ эхосигналов двухантенной системы.

В результате калибровки для обеих приемных антенн в соответствии с (4) определяется фазовая поправка:

$$\begin{cases} \Delta\phi'_A = \left[ \Delta\phi + \frac{2\pi}{\lambda}(R'_{1A} - R'_{2A} - R_1 + R_2) \right] \bmod 2\pi, \\ \Delta\phi'_B = \left[ \Delta\phi + \frac{2\pi}{\lambda}(R'_{1B} - R'_{2B} - R_1 + R_2) \right] \bmod 2\pi. \end{cases} \quad (5)$$

В случае абсолютно точного позиционирования излучателей в точках с координатами  $(x_1, y_1, z_1)$  и  $(x_2, y_2, z_2)$  сигналы излучателей синфазны в обеих точках приема. Это обеспечивает имитацию общего КЦИ [12]. При этом величины  $\Delta\phi'_A$  и  $\Delta\phi'_B$  из (5) оказываются равны между собой. Однако вследствие неточного позиционирования излучатели располагаются в некоторых других точках с координатами  $(x'_1, y'_1, z'_1)$  и  $(x'_2, y'_2, z'_2)$  (Рисунок 5.2), для которых  $\Delta\phi'_A \neq \Delta\phi'_B$ .

Так как  $\Delta\phi'_A$  и  $\Delta\phi'_B$  различаются, то их невозможно одновременно учесть. Определим фазовую ошибку для некоторого значения поправки  $\Delta\phi'$ :

$$\Delta\Phi_{\text{ош}} = \max(|\Delta\phi'_A - \Delta\phi'|, |\Delta\phi'_B - \Delta\phi'|). \quad (6)$$

Логично в качестве фазовой поправки  $\Delta\phi'$  взять среднее арифметическое  $\Delta\phi'_A$  и  $\Delta\phi'_B$  с учетом тонкостей модульной арифметики при работе с фазами:

$$\Delta\phi' = \begin{cases} \frac{\Delta\phi'_A + \Delta\phi'_B}{2}, & |\Delta\phi'_A - \Delta\phi'_B| \leq \pi, \\ \frac{\Delta\phi'_A + \Delta\phi'_B - 2\pi}{2}, & |\Delta\phi'_A - \Delta\phi'_B| > \pi. \end{cases} \quad (7)$$

Тогда выражение для (6) имеет вид:

$$\Delta\Phi_{\text{ош}} = |\Delta\phi'_A - \Delta\phi'| = |\Delta\phi'_B - \Delta\phi'| = \begin{cases} \Delta\Phi_{\text{ош}}, & \Delta\Phi_{\text{ош}} \leq \pi/2, \\ \pi - \Delta\Phi_{\text{ош}}, & \Delta\Phi_{\text{ош}} > \pi/2, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\Delta\Phi_{\text{ош}} = \frac{1}{2} \left( \left[ \frac{2\pi}{\lambda}(R'_{1A} - R'_{2A} - R'_{1B} + R'_{2B}) \right] \bmod 2\pi \right)$  лежит в пределах  $[0; \pi)$ .

Поправка (7) минимизирует фазовую ошибку. Полученное соотношение (7) определяет величину фазовой ошибки, однако оно не позволяет сформулировать пути её минимизации.

## 2. Фазовая ошибка в наихудшем случае

Заметим, что  $\Delta\phi_{\text{ош}}$  – случайная величина. Это вытекает из того, что фактические расстояния между антеннами и излучателями определяются как:

$$R'_{ij} = R_{ij} + \Delta R_{ij}, \quad (9)$$

где  $R_{ij}$  – это расстояние от  $j$ -ой антенны до точки излучения  $i$ , имеющей требуемые координаты;  $\Delta R_{ij}$  – это изменение расстояния между  $j$ -ой антенной и  $i$ -ым излучателем, обусловленное его неточным расположением и имеющее случайный характер.

Так как  $\Delta\phi_{\text{ош}}$  – случайная величина, ограничимся рассмотрением наихудшего случая. Получим соотношение для расчета максимума  $\Delta\phi_{\text{ош}}$ .

Выполним следующие преобразования.

Во-первых, учтем, что для точек с требуемыми координатами выполняется условие синфазности сигналов излучателей в точках приема [12]:

$$\begin{cases} R_{1A} - R_{2A} = n\lambda \\ R_{1B} - R_{2B} = k\lambda \end{cases}, \quad n, k \in \mathbb{Z}$$

Тогда для выражения (8) с учетом (9) мы можем записать:

$$\Delta\phi_{\text{ош}} = \frac{1}{2} \left( \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta R_{1A} - \Delta R_{2A} - \Delta R_{1B} + \Delta R_{2B}) \right] \bmod 2\pi \right), \quad (10)$$

Во-вторых, точность позиционирования излучателей должна удовлетворять условию  $|\Delta R_{ij}| \ll \lambda$ , иначе в соответствии с (8) и (10)  $\Delta\phi_{\text{ош}}$  может достигать  $\pi/2$ . Учитывая это, преобразуем (8) и (10) к виду:

$$\Delta\phi_{\text{ош}} = \frac{\pi}{\lambda} |\Delta R_{1A} - \Delta R_{1B} + \Delta R_{2B} - \Delta R_{2A}| \quad (11)$$

В-третьих, очевидно, что  $|\Delta R_{ij}| \ll R_{ij}$ . Тогда изменение расстояния от  $j$ -ой антенны до  $i$ -го излучателя может быть определено по формуле:

$$\Delta R_{ij} = \left( \overrightarrow{\Delta l_i}, \overrightarrow{R_{ij}} \right) / R_{ij} = \left( \overrightarrow{\Delta l_i}, \overrightarrow{e_{ij}} \right), \quad (12)$$

где  $\overrightarrow{\Delta l_i}$  – вектор случайного смещения  $i$ -го излучателя от требуемого местоположения,  $\overrightarrow{R_{ij}}$  – вектор, проведенный из точки приема  $j$  в точку излучения  $i$ ,  $\overrightarrow{e_{ij}} = \overrightarrow{R_{ij}} / R_{ij}$  – вектор единичной длины, сонаправленный с  $\overrightarrow{R_{ij}}$ .

Подставляем (12) в (11) и после преобразований получаем:

$$\Delta \phi_{\text{ош}} = \frac{\pi}{\lambda} \left| \left( \overrightarrow{\Delta l_1}, \overrightarrow{\Delta e_{1AB}} \right) + \left( \overrightarrow{\Delta l_2}, \overrightarrow{\Delta e_{2BA}} \right) \right|, \quad (13)$$

где  $\overrightarrow{\Delta e_{1AB}} = \overrightarrow{e_{1A}} - \overrightarrow{e_{1B}}$ ,  $\overrightarrow{\Delta e_{2BA}} = \overrightarrow{e_{2B}} - \overrightarrow{e_{2A}}$ .

Из (13) получаем соотношение для расчета фазовой ошибки в наихудшем случае:

$$\begin{aligned} \Delta \phi_{\text{ош max}} &= \frac{\pi}{\lambda} \left[ \left( \overrightarrow{\Delta l_1}, \overrightarrow{\Delta e_{1AB}} \right)_{\text{max}} + \left( \overrightarrow{\Delta l_2}, \overrightarrow{\Delta e_{2BA}} \right)_{\text{max}} \right] = \\ &= \frac{\pi \Delta l}{\lambda} (\Delta e_{1AB} + \Delta e_{2BA}), \end{aligned} \quad (14)$$

где  $\left( \overrightarrow{\Delta l_i}, \overrightarrow{\Delta e_i} \right)_{\text{max}} = - \left( \overrightarrow{\Delta l_i}, \overrightarrow{\Delta e_i} \right)_{\text{min}} = \Delta l \cdot \Delta e_i$ ,  $\Delta l$  – допустимая ошибка позиционирования (максимум модуля вектора  $\overrightarrow{\Delta l_i}$ ).

Отдельно распишем слагаемые из (5.17).

Длина вектора  $\overrightarrow{\Delta e_{1AB}}$  определяется в соответствии с теоремой косинусов [14]:

$$\Delta e_{1AB} = \sqrt{|\vec{e}_{1A}|^2 + |\vec{e}_{1B}|^2 - 2|\vec{e}_{1A}||\vec{e}_{1B}|\cos\beta} = \sqrt{2(1 - \cos\beta)}, \quad (15)$$

где  $\beta$  – угол между векторами  $\vec{R}_{1A}$  и  $\vec{R}_{1B}$  – определяется местоположением 1-го излучателя и рассчитывается по формуле:

$$\cos\beta = \frac{x_1(x_1 - b) + y_1^2 + z_1^2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \sqrt{(x_1 - b)^2 + y_1^2 + z_1^2}}. \quad (16)$$

Длина вектора  $\vec{\Delta e}_{2BA}$  определяется соотношениями, аналогичными (15) и (16).

Наконец, после подстановки (16) и (15) в (14) искомое соотношение для расчета фазовой ошибки в наихудшем случае имеет вид:

$$\Delta\phi_{\text{ош max}} = \frac{\sqrt{2}\pi\Delta l}{\lambda} \left[ \sqrt{1 - \frac{x_1(x_1 - b) + y_1^2 + z_1^2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \sqrt{(x_1 - b)^2 + y_1^2 + z_1^2}}} + \sqrt{1 - \frac{x_2(x_2 - b) + y_2^2 + z_2^2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2} \sqrt{(x_2 - b)^2 + y_2^2 + z_2^2}}} \right]. \quad (17)$$

Соотношение (17) устанавливает связь максимума фазовой ошибки с координатами пары излучателей МИ, точностью их позиционирования и параметрами испытываемой двухантенной РЛС.

В случае большего количества излучателей МИ максимум фазовой ошибки определяется как максимум среди всех значений, рассчитываемых для каждой пары излучателей:

$$\Delta\phi_{\text{ош max}} = \max(\Delta\phi_{\text{ош max } 1}, \Delta\phi_{\text{ош max } 2}, \dots, \Delta\phi_{\text{ош max } N}), \quad (18)$$

где  $\Delta\phi_{\text{ош max } i}$  рассчитывается по (17).

Вместо расчета значений  $\Delta\phi_{\text{ош max } i}$  можно ограничиться оценкой максимума максимум фазовой ошибки. Выражение для  $\Delta\phi_{\text{ош max max}}$  следует из (15) – (17) при условии  $\Delta e_i \rightarrow \Delta e_{i \text{ max}}$  :

$$\Delta\phi_{\text{ош max max}} = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda} \sqrt{\frac{b^2}{(b/2)^2 + y^2 + z^2}}, \quad (19)$$

где  $y = \min(y_1, y_2, \dots, y_N)$ ,  $z = \min(z_1, z_2, \dots, z_N)$ .

В случае большего числа приемных антенн максимум фазовой ошибки рассчитывается относительно каждой пары приемных антенн. Затем среди полученных значений выбирается максимальное, которое принимается за величину максимальной фазовой ошибки для всей конфигурации.

Из полученных соотношений (18) и (19) видно, что фазовая ошибка может быть уменьшена путем:

1. увеличения расстояния между матрицей и антеннами МА;
2. повышения точности позиционирования излучателей;

Также двухантенным РЛС с меньшим расстоянием между приемными антеннами и большей длиной волны соответствуют меньшие значения фазовой ошибки.

### 3. Апробация результатов

Пусть задана двухантенная система с расстоянием между приемными антеннами  $b = 0,3$  м и рабочей длиной волны сигнала  $\lambda = 0,03$  м. На основе результатов работы [12] была разработана матрица из двух излучателей, сигналы которой синфазны в обеих точках приема. Координаты излучателей в системе координат, связанной с антенной А (см. рис. 2):  $(x_1; y_1; z_1) = (-0,4; 3; 0)$  м,  $(x_2; y_2; z_2) = (0,821; 2,975; 0)$  м.

Задавались значения точности позиционирования излучателей МИ  $\Delta l = 2$  мм и  $\Delta l = 5$  мм и значения отношения амплитуд излучаемых сигналов  $z_0 = 0,3$ ,

$z_0 = 1,5$  и  $z_0 = 4$ . С помощью (17) для разработанной матрицы были рассчитаны значения максимальной фазовой ошибки, которые через (1) пересчитывались в максимальное отклонение КЦИ от задаваемого положения. Данные значения сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Расчетные значения максимального отклонения КЦИ от задаваемого положения, нормированные к  $L/2$  и выраженные в процентах.

$z_0$	$\Delta l$ , мм	2	5
0,3		0,015	0,097
1,5		0,008	0,049
2		0,012	0,075

С помощью численных экспериментов осуществлена апробация полученных теоретических результатов. Задавались координаты излучателей матрицы в соответствии с расчетными значениями со случайным смещением, соответствующим значению  $\Delta l$  из таблицы 1. Таким образом точка расположения излучателя – случайная величина с равномерным распределением по окружности радиуса  $\Delta l$  с центром в точке, соответствующей несмещенному положению излучателя.

Затем формировались отсчеты комплексных огибающих сигналов излучателей, которые задавались синфазными и отношение амплитуд которых соответствует величинам  $z_0$  из таблицы 1. Для определения положения моделируемого КЦИ использовалось известное соотношение для моноимпульсной пеленгации [15]. Полученные в результате моделирования значения положения КЦИ сопоставлялись с расчетными по (1), для которых ошибка позиционирования излучателей отсутствует. В результате получали значение отклонения КЦИ от задаваемого положения.

Для каждой ячейки таблицы 1 осуществлено 10 млн. численных экспериментов. Фиксировались результаты эксперимента, для которого смещение КЦИ было максимальным среди всех остальных. Результаты моделирования представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения максимального отклонения КЦИ от задаваемого положения, нормированные к  $L/2$  и выраженные в процентах, полученные по результатам численных экспериментов.

$z_0$	$\Delta l$ , мм	2	5
0,3		0,015	0,097
1,5		0,008	0,049
2		0,012	0,075

Как видно из полученных результатов, смещения КЦИ соответствуют рассчитанным значениям. Результаты численных экспериментов подтверждают достоверность полученных соотношений.

### **Заключение.**

Получены аналитические соотношения для расчета ошибки фазировки пары излучателей матричного имитатора эхосигналов двухантенной системы. Величина  $\Delta\phi_{\text{ш max}}$  характеризует верхнюю границу для значения модуля разности фаз откалиброванных сигналов в обеих точках приема. Для матриц из большего числа излучателей получено соотношение для расчета  $\Delta\phi_{\text{ш max max}}$ . Гарантируется, что модуль разности фаз любой пары излучателей в обеих точках приема не превосходит значения  $\Delta\phi_{\text{ш max max}}$ . Полученные результаты могут быть использованы для большего числа приемных антенн. Проведена апробация теоретических результатов с помощью численных экспериментов.

Результаты данной работы позволяют определить, могут ли быть выполнены для конкретной заданной матрицы, сфокусированной на несколько точек приема, требования к фазировке излучателей после осуществления процедуры калибровки. Полученные результаты могут найти применение при разработке матричных имитаторов эхосигналов многоантенных радиолокационных систем.

### **Финансирование.**

Работа выполнена в рамках проекта по гранту Правительства Новосибирской области, договор по гранту № ГР-7 от 06.07.2021.

## Литература

1. Shannon R. *Systems Simulation: The Art and Science*. Hoboken, New Jersey, USA Prentice Hall. 1975. 368p.
2. Урсатьев А.А., Погребная Н.П. Полунатурная модель сигнально-помеховой радиолокационной обстановки. *Управляемые системы и машины*. 1991. №4. С.102–111.
3. Bender E. *An Introduction to Mathematical Modeling*. Mineola, NY, USA, Dover Publications (Educa Books). 2000. 272 p.
4. Антипов В.Ю., Метельников А.Ю., Токарев Е.Г. Метод и технология полунатурного моделирования бортовых радиосистем ближнего действия фазодоплеровского типа. *Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей»*. 2016. №1. С.32–41. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2016-1-32-41>
5. Patent USA No. EP2005210A1. Sarafian G. *Methods and systems for generating virtual radar targets*. Application Date: 01.03.2007. Publication Date: 24.12.2008.
6. Guo K., Xiao G., Zhai Y., Sheng X. Angular glint error simulation using attributed scattering center models. *IEEE Access*. 2018. P.35194-35205. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2846538>
7. Patent DE No. 112016000274T5. Haghghi K., Rafieinia F. *System for generating virtual radar signatures*. Application Date: 21.10.2016 Publication Date: 12.10.2017.
8. J. Ma, C. Jin, B. Shi, и D. Chen. Analysis of the Simulation Fidelity in Millimeter Wave Simulation System. *Theory, Methodology, Tools and Applications for Modeling and Simulation of Complex Systems*. 2016. Vol.645. P.333-343. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-2669-0\\_37](https://doi.org/10.1007/978-981-10-2669-0_37)
9. Ostrovityanov R.V., Basalov F.A. *Statistical Theory of extended Radar Targets*. Dedham, Massachusetts, USA, Artech House. 1985. 364 p.
10. Киселев А.В., Степанов М.А. Замещение сложного радиолокационного объекта двухточечной моделью. *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2019. №4. С.76–81. <https://doi.org/10.1134/S0002338819040061>

11. Киселев А.В., Подкопаев А.О., Степанов М.А. Оценка и компенсация систематических ошибок калибровки матричного имитатора. *Вопросы радиоэлектроники*. 2018. №4. С.24-28. <https://doi.org/10.21778/2218-5453-2018-4-24-28>
12. Киселев А.В., Сабитов Т.И., Степанов М.А. Имитация углового положения объекта для двухпозиционных систем. *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2020. №2. С.83–88. <https://doi.org/10.31857/S0002338820020079>
13. Sabitov T.I., Kiselev A.V., Stepanov M.A., Oreshkina M.V. Simulation of reflected signals in dual-position radar systems. *Remote Sensing Letters*. 2021. Vol.12. P.1082-1089. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2021.1964708>
14. Korn G., Korn T. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review*. Mineola, NY, USA, Dover Publications (Educa Books). 2013. 1725 p.
15. Sherman S.M., Barton D.K. *Monopulse Principles and Techniques*. Dedham, Mass, USA, Artech House. 2011. 418. p.

**Для цитирования:**

Степано М.А., Сабитов Т.И., Киселёв А.В. Ошибки фазировки матричного имитатора эхосигналов многоантенной радиолокационной системы. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2021. №10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.10.14>