

На правах рукописи



Сабитов Тимур Ильясович

Матричные имитаторы эхосигналов многоантенных радиолокационных систем

Специальность 2.2.16 — Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель:**

**Киселев Алексей Васильевич,**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Ратушняк Василий Николаевич,** кандидат технических наук, начальник кафедры автоматизированных систем управления РТВ ВКС, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»

**Шипилов Сергей Эдуардович,** доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится 15 декабря 2021 г. в 15 ч 30 мин на заседании диссертационного совета 24.2.415.03, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, аудитория 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники и на сайте: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/1eg1404f>

Автореферат разослан «\_\_» октября 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.415.03,

доктор технических наук, профессор

Ю.П. Акулиничев

### **Актуальность темы исследования**

Полунатурное моделирование эхосигналов находит применение в процессе разработки радиолокационных систем (РЛС). С помощью имитаторов воссоздается сигнально-помеховая обстановка, соответствующая реальным условиям работы РЛС. Имитаторы позволяют осуществлять настройку и тестирование РЛС в лабораторных условиях, что снижает материальные затраты на разработку за счет сокращения объема натурных испытаний.

Наиболее востребованными и перспективными являются матричные имитаторы (МИ). Они воспроизводят электромагнитные волны, отражаемые радиолокационной целью и фоном, на апертуре антенны РЛС. Такие имитаторы обеспечивают наиболее полное и достоверное моделирование эхосигналов и позволяют проводить исследования готовой и функционирующей РЛС. С помощью МИ могут быть смоделированы быстрые перемещения цели, перемещения по сложным траекториям, отражения от распределенных объектов с учетом угловых шумов.

Работа МИ основана на том, что матрица излучателей, размеры которой не превышают размеры элемента разрешения, наблюдается как кажущийся центр излучения (КЦИ), положение которого зависит от амплитудно-фазовых соотношений сигналов излучателей. КЦИ замещает либо точечный объект в требуемом угловом положении, либо элементарный отражатель распределенного объекта.

В основе МИ лежит геометрическая модель из точечных отражателей. Отражатели модели соответствуют излучателям матрицы. Данные модели делят на модели с когерентными сигналами, некогерентными сигналами и частично-когерентными сигналами. Для краткости их называют как когерентные, некогерентные и частично-когерентные модели. Аналогичное разделение применяется и к МИ.

Некогерентные и частично когерентные МИ имеют ограниченную область применения. Они могут быть использованы лишь для имитации отражений от распределенных объектов.

Более распространенными являются когерентные МИ. Они используют детерминированные синфазные сигналы, а положение КЦИ изменяется за счет распределения мощности между излучателями. Возможности когерентных МИ по имитации отражений от любых объектов не ограничены, поэтому они получили намного более широкое распространение. В связи с этим далее внимание будет уделено только когерентным МИ.

Несмотря на достаточно полную изученность МИ, до сих пор их рассматривали только применительно к системам, использующих одну приемную антенну. Обозначим эти системы аббревиатурой ОА (одноантенные).

Вместе с тем известно достаточно много радиотехнических систем, работа которых основана на использовании нескольких приемных антенн с разнесенными фазовыми центрами и перекрывающимися диаграммами направленности. Обозначим эти системы аббревиатурой МА (многоантенные). К МА относятся, например, корреляционные измерители скорости и сноса (КРИСС), РЛС с компенсационными каналами приема и т.д. Уровень проработки теоретических и прикладных вопросов МИ ограничен ОА.

Это определило цель данной работы.

**Цель работы** – обосновать методы построения когерентных матричных имитаторов, обеспечивающих моделирование эхосигналов радиолокационной системы, имеющей несколько приемных антенн с разнесенными фазовыми центрами и перекрывающимися диаграммами направленности.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих **основных задач**.

1. Оценить возможность применения известных МИ эхосигналов ОА к имитации эхосигналов МА.

2. Обосновать пути, обеспечивающие развитие теории МИ до уровня имитации эхосигналов МА.

3. Обосновать требования, которым должна удовлетворять геометрическая модель, лежащая в основе когерентного МИ эхосигналов двух-/трехантенной МА.

4. Обосновать методы синтеза геометрических моделей, лежащих в основе когерентных МИ эхосигналов двух-/трехантенных МА.

5. Исследовать ошибки моделирования МИ эхосигналов двух-/трехантенных МА и разработать пути их уменьшения.

6. Развить полученные теоретические результаты до уровня, позволяющего синтезировать МИ.

#### **Научная новизна работы**

1. Получены условия фокусировки сигналов когерентной геометрической модели в двух/трех точках приема, при выполнении которых обеспечивается имитация КЦИ, имеющего общее положение для всех приемных антенн.

2. Обоснованы методы синтеза геометрической модели, лежащей в основе когерентного МИ, позволяющего имитировать КЦИ независимо для каждой антенны МА.

3. Для матриц излучателей, синтезируемых на основе предложенных подходов, установлены зависимости ошибок моделирования от параметров МА и точности задания параметров сигналов.

#### **Практическая значимость**

Полученные результаты практически значимы, поскольку могут быть использованы для разработки матричных имитаторов эхосигналов МА.

1. Получены результаты, позволяющие синтезировать МИ, обеспечивающие имитацию цели, наблюдаемой двумя/тремя антеннами МА в одном и том же положении.

2. Получены результаты, позволяющие синтезировать МИ для имитации отражений от цели независимо для каждой антенны МА, использующего в своей работе две приемные антенны.

3. Получены соотношения для синтеза геометрической модели из 6 излучающих точек. Они позволяют синтезировать МИ для имитации эхосигналов независимо для каждой антенны МА, использующего в своей работе три приемные антенны.

4. Получены соотношения для оценки влияния ошибок фазировки МИ на точность позиционирования моделируемых объектов. Они позволяют определить требования к точности фазировки МИ.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Когерентные геометрические модели, сигналы которых сфокусированы в двух/трех точках на основе подхода кратных фаз таким образом, чтобы обеспечивалась синфазность сигналов во всех точках приема, обеспечивают имитацию КЦИ, имеющего общее положение для всех приемных антенн.

2. Одномерная когерентная геометрическая модель из 5 излучающих точек и двумерная из 10, сигналы которых сфокусированы в двух точках приема на основе подхода компенсации сигналов, обеспечивают для каждой антенны возможность независимого управления положением имитируемого КЦИ.

3. Двумерная когерентная геометрическая модель из 6 излучающих точек, сигналы которой сфокусированы в трех точках приема на основе подходов кратных фаз, компенсации сигналов и предискажения сигналов, позволяет имитировать эхосигналы независимо для каждой антенны.

#### **Методы исследований**

При проведении исследований в работе использовались теория радиолокационных измерений, методы математического анализа, математической статистики. Численное моделирование перемещений КЦИ,

наблюдаемого несколькими приемными антеннами, осуществлялось в среде Matlab.

### **Личный вклад**

Все результаты диссертационной работы получены автором лично. Из 24 опубликованных работ 23 написаны в соавторстве. В материалах, опубликованных в соавторстве, результаты, относящиеся к теме диссертационной работы, получены автором лично.

**Достоверность и обоснованность теоретических результатов** обеспечивается строгостью применяемого математического аппарата и подтверждением результатами численного моделирования.

### **Апробация работы**

Материалы диссертационной работы докладывались на следующих конференциях.

Современные проблемы радиоэлектроники, Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов, Красноярск, СФУ, 2017; Электронные средства и системы управления, 13-я Междунар. науч.-практ. конф., Томск, ТУСУР, 2017; Наука. Промышленность. Оборона. 18-я Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, НГТУ, 2017; The 18 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2017, Altai, Erlagol, 2017; Электронные средства и системы управления, 14-я Междунар. науч.-практ. конф., Томск, ТУСУР, 2018; Интеллектуальный потенциал Сибири, 26-я науч. студ. конф., Новосибирск, НГТУ, 2018; Наука. Промышленность. Оборона. 19-я Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, НГТУ, 2018; Наука. Промышленность. Оборона. 20-я Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, НГТУ, 2019; Интеллектуальный потенциал Сибири, 27-я науч. студ. конф., Новосибирск, НГТУ, 2019; International multi-conference on engineering, computer and information sciences, SIBIRCON 2019, Novosibirsk, Academpark, 2019; Интеллектуальный потенциал Сибири, 28-я Региональная научная студенческая конференция, Новосибирск, НГТУ, 2020; Наука. Технологии. Инновации. 21-я

Всероссийская научная конференция молодых ученых, Новосибирск, НГТУ, 2020; Наука. Промышленность. Оборона. 21-я Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, НГТУ, 2020; Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering, International scientific-technical conference, Novosibirsk, NSTU, 2020.

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 24 работы. Из них 2 в периодических изданиях, входящих в международные библиографические системы Scopus и Web of Science, 9 в периодических изданиях из перечня ВАК, 13 в трудах конференций международного, всероссийского и регионального уровней.

**Внедрение результатов работы** подтверждено соответствующим актом о внедрении.

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, включающего 117 наименований, и двух приложений. Текст диссертации изложен на 160 страницах, содержит 40 рисунков и 10 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи, кратко изложено содержание работы, описаны научная новизна и практическая значимость работы.

**В первом разделе** рассмотрены когерентные МИ эхосигналов ОА. Показано, что когерентные МИ, разработанные для ОА, неприменимы для имитации эхосигналов МА.

Рассмотрим конфигурацию из двух излучателей МИ применительно к МА, использующей две приемные антенны (Рисунок 1).

Очевидно, что эквидистантное расположение излучателей сразу для обеих точек приема невозможно. Эквидистантное расположение излучателей для

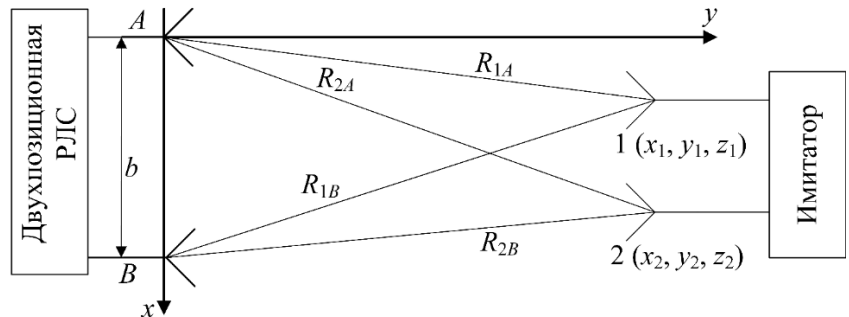


антенны  $A$  ( $R_{1A} = R_{2A}$ ) влечет дополнительный набег фазы (в общем случае не кратный  $2\pi$ ) сигнала от дальнего излучателя для антенны  $B$ :

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(R_{1B} - R_{2B}),$$

где  $\lambda$  – длина волны несущего колебания.

Различия в фазовых соотношениях сигналов, принимаемых антеннами  $A$  и  $B$ , приводят к тому, что эти антенны наблюдают КЦИ в разных положениях. Это следует из соотношения для координаты КЦИ, нормированной к половине размера конфигурации:



*Рисунок 1. Конфигурация из двух излучателей применительно к двухантенной системе 1,2 – излучатели, A, B – приемные антенны, b – расстояние между антеннами,  $R_{ij}$  – расстояние между  $i$ -ым излучателем и  $j$ -ой антенной*

$$\Delta\xi = \frac{\Delta l}{L/2} = \frac{z_0^2 - 1}{1 + 2z_0 \cos \psi + z_0^2}, \quad (1)$$

где  $z_0 = E_2/E_1$  и  $\psi$  – отношение амплитуд и разность фаз сигналов в точке приема соответственно,  $\Delta l$  – линейное отклонение КЦИ от геометрического центра матрицы,  $L$  – расстояние между излучателями.

Для того, чтобы использовать МИ для имитации эхосигналов МА, использующей две приемные антенны, необходимо в точках приема обеспечить соответствие параметров сигналов МИ требуемым параметрам. По сути, необходимо сфокусировать сигналы излучателей в обеих точках приема. Фокусировка сигналов излучателей МИ может базироваться на одном из двух предлагаемых подходов.

Первый подход обозначен как подход кратных фаз. Он заключается в следующем: необходимо расположить излучатели МИ таким образом, чтобы разность хода лучей до каждой из точек приема составляла целое число длин волн. В формализованном виде для матрицы из двух излучателей (Рисунок 1) этот подход имеет вид системы уравнений:

$$\begin{cases} \sqrt{x_1^2 + y_1^2} - \sqrt{x_2^2 + y_2^2} = n\lambda, \\ \sqrt{(x_1 - b)^2 + y_1^2} - \sqrt{(x_2 - b)^2 + y_2^2} = k\lambda, \end{cases} \quad (2)$$

где  $x_i$  и  $y_i$  – координаты  $i$ -го излучателя,  $b$  – расстояние между антеннами;  $n, k$  – целые числа.

В зависимости от начальных условий, определяющих ограничения на формируемую конфигурацию, система (2) имеет различные решения в виде соотношений для расчета координат излучателей. Увеличение количества излучателей дополнит систему (2) аналогичными уравнениями.

Выполнение записанных условий обеспечит имитацию КЦИ, имеющего общее положение для обеих антенн.

Второй подход обозначен как подход компенсации сигналов.

Раскроем данный подход на примере двух приемных антенн. Пусть имеется конфигурация из  $N$  излучателей МИ. Она должна быть такой, что положение КЦИ для первой антенны определяется сигналами только части из  $N$  излучателей. А сигналы, определяющие координаты КЦИ для другой антенны, не должны оказывать влияние на это положение, что достигается через компенсацию сигналов. Аналогичное должно иметь место и для второй антенны. Тогда эхосигнал от имитируемого объекта для каждой из антенн должен формироваться минимум парой из  $N$  точек.

Подход компенсации сигналов позволит разработать МИ для имитации положений КЦИ независимо для нескольких приемных антенн.

В заключении первого раздела конкретизируются задачи диссертационной работы.

**Второй раздел** посвящен подходу кратных фаз к синтезу геометрических моделей, лежащих в основе когерентных МИ.

При условии расположения излучателей одномерной конфигурации на одной прямой (что облегчает реализацию МИ), параллельной базе (то есть  $y_i = y_j = y$ ), их максимальное количество равно четырем. При этом матрица является вертикально симметричной, и координаты излучателей связаны системой уравнений, вытекающей из (2):

$$\begin{cases} \sqrt{x_1^2 + y^2} - \sqrt{x_2^2 + y^2} = n_1\lambda, \\ \sqrt{(x_1 - b)^2 + y^2} - \sqrt{(x_2 - b)^2 + y^2} = n_2\lambda, \\ \sqrt{x_1^2 + y^2} - \sqrt{(x_1 - b)^2 + y^2} = n_3\lambda, \end{cases} \quad (3)$$

Координаты 3-го и 4-го излучателей рассчитываются из условия симметрии:  $x_3 = b - x_2$ ,  $x_4 = b - x_1$ .

Решение системы (3) в виде координат излучателей может быть найдено с помощью численных методов решения систем нелинейных уравнений (например, метод Ньютона, метод Левенберга-Марквардта и т.д.)

Предложен следующий алгоритм синтеза конфигурации.

- Задаются расстояние между антеннами  $b$  и длина волны  $\lambda$  и ориентировочные координаты излучающих точек  $x_1'$ ,  $x_2'$  и  $y'$ .
- Из (3) рассчитываются  $n$  и  $k$ . Полученные  $n$  и  $k$  округляются до ближайших целочисленных значений.
- Для полученных значений  $n$  и  $k$  с помощью численных методов из (3) находятся координаты излучателей.

Очевидно, что получаемые с помощью алгоритма точки расположения излучателей близки к задаваемым положениям.

При условии заданного положения первого излучателя, из (2) получены соотношения для расчета координат второго:

$$\begin{cases} x_2 = x_1 + \frac{n^2 - k^2}{2b} \lambda^2 + \frac{\lambda}{b} \left( k \sqrt{(x_1 - b)^2 + y_1^2} - n \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \right), \\ y_2 = \sqrt{\left( \sqrt{x_1^2 + y_1^2} - n \lambda \right)^2 - x_2^2}. \end{cases} \quad (4)$$

Синтез конфигурации из двух излучателей осуществляется по предложенному выше алгоритму, с учетом того, что координаты второго излучателя задаются ориентировочно и используются соотношения (4). При этом соотношения для синтеза могут быть использованы циклично для получения матрицы из  $N$  излучателей необходимого углового размера.

Однако излучатели такой матрицы не могут быть размещены на одной прямой. Действительно, положив  $y_2 = y_1$ , из (2) следует нелинейная однозначная взаимосвязь между параметрами  $n$  и  $k$ , которая противоречит условию их принадлежности к множеству целых чисел:

$$k = \frac{1}{\lambda} \left[ R_{1B} - \sqrt{\left( \pm \sqrt{(R_{1A} - n\lambda)^2 - y_1^2} - b \right)^2 + y_1^2} \right],$$

где  $R_{1A} = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$ ,  $R_{1B} = \sqrt{(x_1 - b)^2 + y_1^2}$ .

Полученные результаты по синтезу одномерных матриц, сигналы которых сфокусированы в двух точках приема, могут быть применены для синтеза двумерных горизонтально симметричных матриц.

Для синтеза двумерной матрицы достаточно синтезировать одномерную и зеркально отобразить её относительно плоскости симметрии  $z = 0$ . При этом соответствующие соотношения для расчета положения излучателей аналогичны (3) и (4) и отличаются от них лишь наличием  $z$ -координаты под знаками радикалов.

**Третий раздел** направлен на развитие результатов, полученных во втором разделе, применительно к трехантенным системам.

Для общего случая расположения приемных антенн получены соотношения для расчета координат излучателей матрицы, сигналы которой

сфокусированы в трех точках приема:

$$x_2 = \frac{1}{2(x_b z_c - x_c z_b)} \left[ (x_b^2 + z_b^2) z_c - (x_c^2 + z_c^2) z_b + (z_c - z_b)(R_{1A} - n\lambda)^2 - z_c (R_{1B} - k\lambda)^2 + z_b (R_{1C} - m\lambda)^2 \right], \quad (5)$$

$$z_2 = \frac{1}{2z_b} \left[ x_b^2 + z_b^2 - 2x_2 x_b + (R_{1A} - n\lambda)^2 - (R_{1B} - k\lambda)^2 \right], \quad (6)$$

$$y_2 = \sqrt{(R_{1A} - n\lambda)^2 - x_2^2 - z_2^2}. \quad (7)$$

Соотношения (5) – (7)

позволяют при заданных координатах первого излучателя рассчитать координаты второго. При этом они могут быть использованы циклично для синтеза протяженной матрицы. Однако излучатели такой матрицы не могут быть размещены на одной прямой.

Для случая горизонтально симметричных антенных систем

получены соотношения для синтеза двумерной матрицы из 4 излучателей, лежащих в углах прямоугольника (Рисунок 2).

Считаем, что заданы  $x$ - и  $y$ -координаты 1-го излучателя, тогда выражение для расчета его  $z$ -координаты имеет вид:

$$z_1 = -k\lambda \sqrt{\frac{(x_1 - x_b)^2 + y_1^2}{4z_b^2 - k^2\lambda^2} + \frac{1}{4}}. \quad (8)$$

Координаты 3-го излучателя рассчитываются по соотношениям:

$$x_3 = x_1 + \frac{n^2\lambda^2}{2x_b} - \frac{n\lambda}{x_b} \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}, \quad y_3 = \sqrt{(x_1 - x_b)^2 - (x_3 - x_b)^2 + y_1^2}. \quad (9)$$

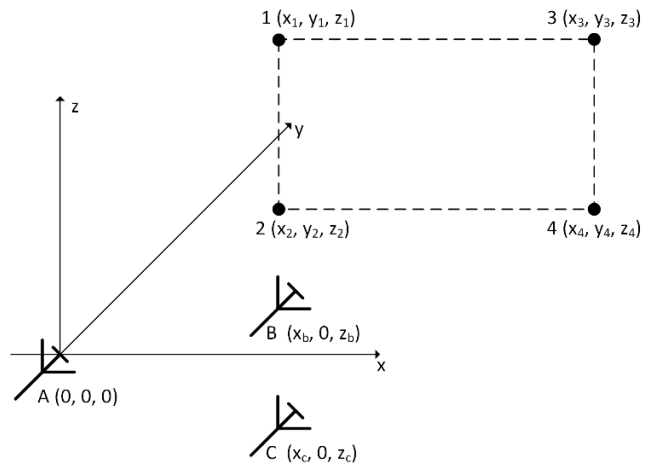


Рисунок 2. 4-точечная двумерная матрица применительно к горизонтально симметричной трехантенной системе

Нижняя половина матрицы получается путем отображения полученных точек излучения № 1 и 3.

Выражения (8) и (9) применимы для антенных систем, ДН которых ориентированы по нормали к плоскости расположения антенн (случай КРИСС).

Полученный результат распространен на системы из трех антенн, оси ДН которых принадлежат плоскости расположения антенн (как при расположении антенн поперек фюзеляжа летательного аппарата).

**Четвертый раздел** посвящен подходу компенсации сигналов к синтезу геометрических моделей, лежащих в основе когерентных МИ.

Пусть задана конфигурация из  $N$  излучателей и требуется, чтобы КЦИ имитировался только парой из них, равноудаленных от антенны (излучатели №1 и 2 на Рисунке 3). Тогда должно выполняться равенство соотношений, описывающих

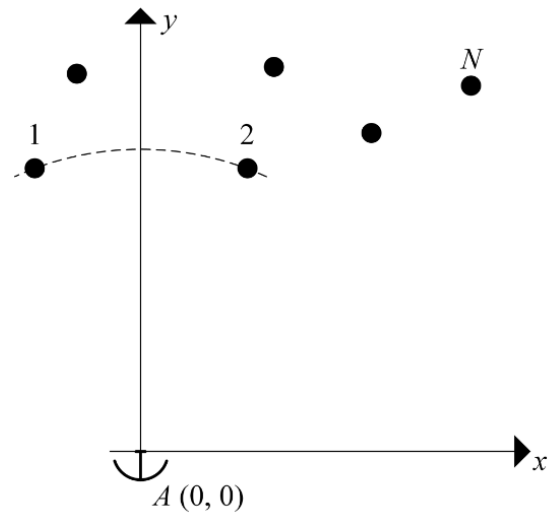


Рисунок 3. Конфигурация из  $N$  излучателей

положение КЦИ, имитируемого парой излучателей и всей матрицей:

$$\frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \xi_i E_i E_j \cos(\varphi_i - \varphi_j)}{(E_1 \cos \varphi_1 + E_2 \cos \varphi_2)^2 + (E_1 \sin \varphi_1 + E_2 \sin \varphi_2)^2} = \frac{\left( \sum_{i=1}^N E_i \cos \varphi_i \right) \left( \sum_{i=1}^N \xi_i E_i \cos \varphi_i \right) + \left( \sum_{i=1}^N E_i \sin \varphi_i \right) \left( \sum_{i=1}^N \xi_i E_i \sin \varphi_i \right)}{\left( \sum_{i=1}^N E_i \cos \varphi_i \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^N E_i \sin \varphi_i \right)^2}. \quad (10)$$

С учетом синфазного излучения 1-го и 2-го излучателей ( $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ ) из (10) установлено, что сигналы остальных излучателей (с 3 по  $N$ ) должны удовлетворять условиям компенсации (11) и ортогональности (12) сигналов:

$$\sum_{i=3}^N E_i \cos \varphi_i = 0, \quad \sum_{i=3}^N E_i \sin \varphi_i = 0, \quad (11)$$

$$\phi - \varphi_j = \pi/2, j = 3 \dots N. \quad (12)$$

На основе полученных условий предложена одномерная матрица из 5 излучателей, принадлежащих одной прямой. Она обеспечивает имитацию КЦИ независимо для двух антенн. С учетом симметрии:  $x_1 + x_5 = b$ ,  $x_2 + x_4 = b$ ,  $x_1 = -x_4$  – получены соотношения для расчета координат излучателей данной матрицы:

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - b)^2 + y^2} - \sqrt{(x_1 + b)^2 + y^2} = n_1 \lambda, \\ \sqrt{x_1^2 + y^2} - \sqrt{(x_1 + b)^2 + y^2} = (2n_2 + 1)\lambda/4, \end{cases} \quad (13)$$

где  $b$  – расстояние между антеннами.

Получены соотношения для расчета амплитуд и фаз сигналов излучателей в зависимости от задаваемых положений КЦИ:

$$E_1 = E_c \frac{1 - \Delta \xi_A}{2}, \quad E_2 = E_c \frac{1 - \Delta \xi_B}{2}, \quad E_4 = E_c \frac{1 + \Delta \xi_A}{2}, \quad E_5 = E_c \frac{1 + \Delta \xi_B}{2}, \quad E_3 = E_c,$$

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_4 = \varphi_5 = 0, \quad \varphi_3 = \pi - \frac{2\pi}{\lambda} \left( \sqrt{l^2 + \left(b + \frac{L}{2}\right)^2} - \sqrt{l^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right),$$

где  $L = x_4 - x_1 = x_5 - x_2$ ;  $\Delta \xi_A$  и  $\Delta \xi_B$  – координаты КЦИ, нормированные к  $L/2$  и задаваемые для приемных антенн  $A$  и  $B$  соответственно.

На основе одномерной матрицы получена двумерная матрица из 10 излучателей. Она имеет горизонтальную симметрию, и её верхняя половина представляет собой рассмотренную выше 5-точечную матрицу. Показано, что двумерная матрица

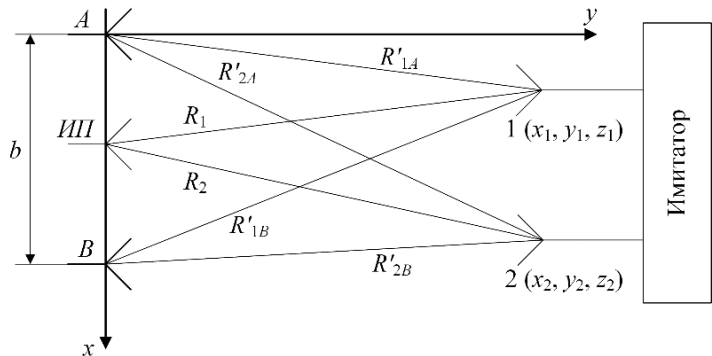


Рисунок 4. Система калибровки применительно к двухантенной системе (ИП – изм. приемник системы калибровки)

обеспечивает независимое управление положением КЦИ для двух антенн по одной из угловых координат.

**Пятый раздел** посвящен вопросам практического использования полученных результатов.

Рассмотрено применение системы калибровки МИ из двух излучателей, сигналы которых сфокусированы в двух точках приема (Рисунок 4).

Показано, что идеальная калибровка амплитуд и фаз недостижима. Получены соотношения для расчета амплитудной ошибки (14) и фазовой в наихудшем случае (15):

$$\Delta Z_{\text{ош}} = 5 \left| \lg \left( \frac{(x_1^2 + y_1^2 + z_1^2)((x_2 - b)^2 + y_2^2 + z_2^2)}{(x_2^2 + y_2^2 + z_2^2)((x_1 - b)^2 + y_1^2 + z_1^2)} \right) \right|, \quad (14)$$

$$\Delta \phi_{\text{ош max}} = \frac{\sqrt{2}\pi\Delta l}{\lambda} \left[ \sqrt{1 - \frac{x_1(x_1 - b) + y_1^2 + z_1^2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \sqrt{(x_1 - b)^2 + y_1^2 + z_1^2}}} + \sqrt{1 - \frac{x_2(x_2 - b) + y_2^2 + z_2^2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2} \sqrt{(x_2 - b)^2 + y_2^2 + z_2^2}}} \right], \quad (15)$$

где  $\Delta l$  – допустимая ошибка позиционирования излучателей.

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

Исследованы ошибки моделирования матрицы из 5 излучателей, построенной на основе подхода компенсации сигналов, в виде смещения КЦИ от задаваемого положения с помощью соотношения:

$$\Delta \alpha(\alpha) = \begin{cases} \frac{a_1(\alpha)}{2a_2(\alpha)} + \sqrt{\left(\frac{a_1(\alpha)}{2a_2(\alpha)}\right)^2 + \frac{\delta E_{\text{H}}(\alpha)}{a_2(\alpha)}}, & \text{при } \frac{a_1(\alpha)}{2a_2(\alpha)} < 0, \\ \frac{a_1(\alpha)}{2a_2(\alpha)} - \sqrt{\left(\frac{a_1(\alpha)}{2a_2(\alpha)}\right)^2 + \frac{\delta E_{\text{H}}(\alpha)}{a_2(\alpha)}}, & \text{при } \frac{a_1(\alpha)}{2a_2(\alpha)} \geq 0, \end{cases} \quad (16)$$



где  $\alpha$  – текущая угловая координата сканирования ДН;  $a_1(\alpha) = dF(x)/dx|_{x=\alpha}$ ,  
 $a_2(\alpha) = 0,5 dF^2(x)/dx^2|_{x=\alpha}$  – параметры аппроксимации ДНА  $F(\alpha)$  полиномом  
второй степени;  $\delta E_n(\alpha) = F_n(\alpha) - F(\alpha - \alpha_0)$  – нормированная функция ошибки;  
 $\alpha_0$  – угловая координата КЦИ;  $F_n(\alpha)$  – эквивалентная искаженная  
нормированная ДНА.

Графический анализ соотношения (16) применительно к разработанной матрице показал, что ошибки практически идентичны ошибкам моделирования эквивалентной двухточечной синфазной матрицы. Как следует из литературы, синфазные матрицы обладают наименьшими ошибками моделирования.

Показано, что наличие модуляции в эхосигнале приводит к флуктуациям положения КЦИ, имитируемого МИ для двухантенной МА. Получены соотношения для расчета ширины диапазона флуктуаций  $\Delta_\xi$  при амплитудной однотоновой модуляции (17) и при линейной-частотной модуляции (18):

$$\Delta_\xi = \frac{z_{\max} - 1}{z_{\max} + 1} - \frac{z_{\min} - 1}{z_{\min} + 1}, \text{ где } \begin{cases} z_{\max} \approx z_0 \left[ 1 + \frac{2m}{\sqrt{1-m^2}} \cdot \frac{\pi n F}{f_0} \right] \\ z_{\min} \approx z_0 \left[ 1 - \frac{2m}{\sqrt{1-m^2}} \cdot \frac{\pi n F}{f_0} \right] \end{cases}, \quad (17)$$

$$\Delta_\xi = \frac{z_0^2 - 1}{z_0^2 + 2z_0 \cos(\Delta\psi_{\max}) + 1} - \frac{z_0 - 1}{z_0 + 1}, \text{ где } \Delta\psi_{\max} = \frac{\pi n \Delta f}{f_0} \left( 1 - \frac{n}{f_0 T_c} \right). \quad (18)$$

Результаты предыдущих разделов использованы для разработки проекта МИ эхосигналов системы КРИСС. Разработана модель из 6 излучающих точек, сигналы которой сфокусированы на три антенны КРИСС с использованием подходов кратных фаз, компенсации сигналов и предискажения сигналов МИ.

Проверка адекватности модели осуществлена с помощью численного моделирования. В численной модели имитировались КЦИ, соответствующие точечным отражателям движущейся подстилающей поверхности. Получаемые зависимости амплитуды и фазы сигналов, снимаемых с антенн, и взаимно-

корреляционных функций сопоставлялись с аналогичными зависимостями, получаемыми для модели отражений от реальной поверхности.

Результаты численных экспериментов показали, что разработанная геометрическая модель, лежащая в основе когерентного МИ, обеспечивает адекватное моделирование отражений от движущейся подстилающей поверхности для системы КРИСС.

**В заключении** перечислены основные результаты работы.

**В приложении А** вынесены некоторые интересные результаты по развитию подхода кратных фаз.

На примере одномерной матрицы (Рисунок 1) показано, что возможность управления фазами обеспечивает дополнительную степень свободы в размещении излучателей.

Так в случае симметричной конфигурации при расположении 1-го излучателя на оси симметрии  $x_1 = b/2$  (Рисунок 1), все остальные могут быть размещены на одной прямой, параллельной базе (что недостижимо при синтезе матрицы на основе подхода кратных фаз). Соотношения для расчета абсцисс излучателей симметричной матрицы и фазовой добавки относительно опорного сигнала 1-го излучателя имеют вид:

$$x_2 = \frac{b}{2} \pm \frac{n\lambda}{2} \sqrt{1 + \frac{4y^2}{b^2 - n^2\lambda^2}}, \quad \Delta\varphi_2 = \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \left( \sqrt{x_1^2 + y^2} - \sqrt{x_2^2 + y^2} \right) \right] \bmod 2\pi.$$

где mod – операция взятия остатка от целочисленного деления.

**В приложении Б** представлен акт о внедрении результатов диссертационного исследования.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе обоснованы методы построения когерентных матричных имитаторов, обеспечивающих моделирование эхосигналов радиолокационной системы, имеющей несколько приемных антенн с разнесенными фазовыми центрами и перекрывающимися ДНА.

1. Предложен подход кратных фаз к построению геометрической модели, лежащей в основе когерентного МИ, основанный на выполнении условия синфазности сигналов во всех точках приема. Получены соотношения для синтеза модели. Показано, что получаемые матрицы обеспечивают возможность имитации общего КЦИ, наблюдаемого антеннами двух-/трехантенной системы в одном и том же положении.

2. Предложен подход компенсации сигналов к построению геометрической модели, лежащей в основе когерентного МИ. Сформулированы требования и получены условия, на основании которых разработаны одномерная и двумерная матрицы излучателей, сигналы которых сфокусированы в двух точках приема. Одномерная матрица включает 5 излучателей, двумерная – 10. Показано, что разработанные когерентные геометрические модели позволяют независимо для каждой антенны управлять положением КЦИ по одной из угловых координат.

3. Разработан проект МИ эхосигналов системы КРИСС. Синтез модели осуществлен на основе комбинации подхода кратных фаз, подхода компенсации сигналов и предискажения сигналов. Полученная матрица позволяет имитировать эхосигналы независимо для каждой антенны КРИСС. Осуществлена апробация матрицы, результаты которой подтвердили достоверность теоретических результатов.

Теоретические результаты диссертационной работы имеют практическое значение и могут быть использованы для разработки МИ эхосигналов МА.

1. Полученные результаты позволяют синтезировать МИ эхосигналов МА, использующего две/три приемные антенны. В зависимости от используемого подхода к построению МИ обеспечивается либо имитация общего КЦИ для приемных антенн, либо имитация КЦИ независимо для каждой приемной антенны.

2. Разработан проект МИ эхосигналов КРИСС. На примере имитации отражений от движущейся подстилающей поверхности показано, что

полученные результаты могут быть использованы для адекватного моделирования эхосигналов КРИСС с помощью МИ.

3. Установлены функциональные зависимости, позволяющие оценить ошибки моделирования эхосигналов для заданных параметров МА и параметров геометрической модели, лежащей в основе когерентного МИ. На основе полученных зависимостей сформулированы пути снижения уровня ошибок моделирования.

Дальнейшие научные исследования могут быть направлены на разработку способов синтеза МИ эхосигналов МА, использующих большее число приемных антенн.

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Статьи в научных журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций**

1. Сабитов Т. И. Коррекция амплитудной ошибки в матричных имитаторах радиолокационных целей / Т. И. Сабитов, А. В. Киселев // Радиопромышленность. - 2020. - Т. 30, № 4. - С. 106–110

2. Киселев А. В. Двумерная частично когерентная геометрическая модель распределенного радиолокационного объекта / А. В. Киселев, Т. И. Сабитов, М. А. Степанов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. - 2020. – № 1-2 (46-47). – С. 28–36.

3. Сабитов Т. И. Имитация эхосигналов двухпозиционной системы с использованием матрицы из пяти излучателей / Т. И. Сабитов, А. В. Киселев // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. - 2020. – Т. 49, № 5. – С. 6–9

4. Сабитов Т. И. Пространственно-фазовая фокусировка излучателей матричного имитатора на две точки приема / Т. И. Сабитов; [науч. рук. А. В. Киселев] // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. - 2020. – № 1-2 (46-47). – С. 60–67

5. Сабитов Т. И. Имитация эхосигналов двухпозиционных систем с использованием когерентных излучателей / Т. И. Сабитов, А. В. Киселев // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. - 2019. – № 4. – С. 42–46.

6. Сабитов Т. И. Матричный имитатор эхосигналов двухпозиционной радиолокационной системы / Т. И. Сабитов, А. В. Киселев // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. - 2019. – № 4. – С. 6–10.

7. Сабитов Т. И. Требования к точности задания параметров сигналов, излучаемых матричным имитатором / Т. И. Сабитов, М. А. Степанов, А. В. Киселев // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. - 2019. – № 4. – С. 27–31.

8. Сабитов Т. И. Границы области достижимых значений параметров функции распределения шумов координат распределенного радиолокационного объекта, замещаемого геометрической моделью, составленной из излучателей коррелированных сигналов / Т. И. Сабитов, А. В. Киселев, М. А. Степанов // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. – 2017. – № 4. – С. 36–39.

9. Сабитов Т. И. Модель распределенного радиолокационного объекта, составленная из излучателей коррелированных сигналов / Т. И. Сабитов, А. В. Киселев, М. А. Степанов // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. – 2017. – № 4. – С. 40–43.

**Публикации в изданиях, включенных в международные базы данных цитирования Web of Science или Scopus**

10. Kiselev A. V. Simulating an object's altitude for two-position systems / A. V. Kiselev, T. I. Sabitov, M. A. Stepanov // Journal of Computer and Systems Sciences International. - 2020. – Vol. 59, iss. 2. – P. 217–222

11. Simulation of reflected signals in dual-position radar systems / T. I. Sabitov, A. V. Kiselev, M. A. Stepanov, M. V. Oreshkina. // Remote Sensing Letters. - 2021. - Vol. 12, iss. 11. - P. 1082-1089.

12. Kiselev A. V. Simulation of Objects for a Three-position Radar System / A. V. Kiselev, T. I. Sabitov // International Conference Problems of Informatics,

Electronics, and Radio Engineering, Novosibirsk, 10-11 Dec. 2020: IEEE, 2020. - P. 28-31

13. Sabitov T. I. A matrix simulator of echo signals of twoposition radar station / T. I. Sabitov, A. V. Kiselev, M. A. Stepanov // International multi-conference on engineering, computer and information sciences: conf. proc., Novosibirsk, 21 Oct 2019. – IEEE, 2019. - P. 588–590.

14. Kiselev A. V. Possibilities of a two-point model, radiating correlated signals / A. V. Kiselev, T. I. Sabitov, M. A. Stepanov // The 18 intern. conf. of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2017 : proc., Altai, Erlagol. – Novosibirsk : NSTU, 2017. – P. 91–93.

15. Kiselev A. V. Two-point model composed of radiators of correlated signals / A. V. Kiselev, T. I. Sabitov, M. A. Stepanov // The 18 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2017 : proc., Altai, Erlagol. – Novosibirsk : NSTU, 2017. – P. 131–134.

#### *Публикации в других научных изданиях*

16. Сабитов Т. И. Матрица излучателей, имитирующая эхосигналы трехпозиционной системы произвольной конфигурации / Т. И. Сабитов, А. В. Киселев, М. А. Степанов // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 21 Всерос. науч.-техн. конф.: Изд-во НГТУ, 2020. – Т. 2. – С. 167–172.

17. Сабитов Т. И. Двухточечная конфигурация когерентной модели, синфазной в двух точках приема / Т. И. Сабитов, А. В. Киселев // Интеллектуальный потенциал Сибири : сб. науч. тр. 27 регион. науч. студен. конф. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – Ч. 2. – С. 382–384.

18. Степанов М. А. Математическое моделирование параметров совместной функции распределения угловых шумов координат / М. А. Степанов, Т. И. Сабитов, А. В. Киселев // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 20 Всерос. науч.-техн. конф.: Изд-во НГТУ, 2019. – Т. 2. – С. 281–286.

19. Сабитов Т. И. Оценка стабильности параметров функции распределения шумов координат, моделируемых двухточечной моделью

распределенного объекта на коррелированных излучателях / Т. И. Сабитов, М. А. Степанов, А. В. Киселев // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 19 Всерос. науч.-техн. конф.: Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 2. – С. 225–229.

20. Сабитов Т. И. Устойчивость двухточечной квазикогерентной модели распределенного объекта по параметрам функции распределения шумов координат / Т. И. Сабитов, М. А. Степанов // Интеллектуальный потенциал Сибири: сб. науч. тр. 26 регион. науч. студ. конф. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 2. – С. 488–490.

21. Сабитов Т. И. Влияние неточности задания параметров сигналов двухточечной квазикогерентной модели на характеристики моделируемых шумов координат/ Т. И. Сабитов, М. А. Степанов, А. В. Киселев // Электронные средства и системы управления : материалы докл. 14 Междунар. науч.-практ. конф. - Томск: В-Спектр, 2018. - Ч. 1. - С. 25-27.

22. Сабитов Т. И. Двухточечная геометрическая модель распределенного радиолокационного объекта, составленная из излучателей случайных сигналов с заданным коэффициентом взаимной корреляции / Т. И. Сабитов, М. А. Степанов, А. В. Киселев // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 18 Всерос. науч.-техн. конф. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – Т. 2. – С. 274-279

23. Сабитов Т. И. Модель распределенного радиолокационного объекта на основе коррелированных излучателей / Т. И. Сабитов, М. А. Степанов, А. В. Киселев // Электронные средства и системы управления : материалы докл. 13 Междунар. науч.-практ. конф. – Томск : В-Спектр, 2017. – Ч. 1. – С. 43–46.

24. Сабитов Т. И. Модель распределенного радиолокационного объекта на основе системы излучателей коррелированных случайных сигналов / Т. И. Сабитов, М. А. Степанов ; науч. рук. А. В. Киселев // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов. – Красноярск : Изд-во СФУ, 2017. – С. 92–95.