

УДК 621.396.96

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ МІМО РЛС

А.О. Подкопаев, В.В. Артюшенко, М.А. Степанов, В.С. Соколов
Новосибирский государственный технический университет

В статье представлены результаты разработки и верификации имитационной модели антенной решетки МІМО РЛС. Актуальность исследования обусловлена растущим применением МІМО-технологий в радиолокации, позволяющих формировать виртуальную апертуру с улучшенными направленными свойствами при меньшем количестве физических элементов. Целью работы является создание универсальной программной модели для анализа и синтеза МІМО-решеток различной конфигурации с поддержкой различных типов зондирующих сигналов. В основе модели лежит математический аппарат, описывающий формирование виртуальной решетки, излучение ортогональных сигналов, их прием, обработку согласованными фильтрами и последующее синфазное суммирование. Алгоритм моделирования включает поэтапный расчет излученного сигнала, моделирование приема на каждом элементе, выделение ортогональных составляющих и итоговое суммирование для получения диаграммы направленности. Основные результаты получены для двух типов комплексных огибающих: короткого видеоимпульса и ЛЧМ-сигнала. Проведено сравнение ДН моделируемой МІМО-решетки и эталонной классической решетки, элементы которой расположены в соответствии с рассчитанными позициями элементов виртуальной апертуры. Результаты показали полное совпадение диаграмм направленности решеток с относительной погрешностью, не превышающей 1 %, что подтверждает адекватность модели. Сделан вывод о возможности использования наиболее простого с вычислительной точки зрения сигнала – короткого видеоимпульса – для дальнейших исследований характеристик МІМО-антенн с помощью предложенного метода. Разработанная модель предназначена для использования при проектировании и оптимизации конфигураций антенных решеток МІМО РЛС.

Ключевые слова: МІМО РЛС, антенная решетка, имитационное моделирование, виртуальная апертура, диаграмма направленности, ЛЧМ-сигнал, согласованный фильтр.

DOI: 10.17212/1727-2769-2025-3-29-44

Введение

В настоящее время в радиолокации все большее распространение получают МІМО антенные решетки [1–6]. Их передающие элементы излучают взаимно ортогональные сигналы и разнесены в пространстве относительно приемных элементов. Приемные элементы при этом осуществляют прием и обработку совокупности ортогональных сигналов, отраженных от целей. Такая обработка сигналов имеет название *multiple input – multiple output* или МІМО, а антенная система называется соответственно МІМО антенной решеткой [1–6]. МІМО обработка сигналов позволяет сформировать

на приемной стороне виртуальную апертуру антенной решетки, чьи размеры больше, чем апертуры реальных приемных и передающих антенных решеток. Кроме того, виртуальная решетка содержит большее число элементов, чем реальная. Это означает возможность обеспечения ММО антенной решеткой требуемых направленных характеристик при меньшем количестве реальных элементов в ее составе, по сравнению с классической антенной решеткой. Кроме того, ММО обработка позволяет «обужать» основной луч диаграммы направленности (ДН) антенной системы, снижать уровень боковых лепестков, а также применять различные алгоритмы по регулированию формы ДН [2–4]. Это определяет актуальность исследования и разработки ММО антенных систем для радиолокационных станций (РЛС).

Имитационное моделирование ММО антенных решеток позволяет на раннем этапе разработки изучить предполагаемые конфигурации приемной, передающей и виртуальной частей такой антенной системы, оценить особенности ее функционирования при различных типах сигналов, подводимых к элементам решетки, а также оценить многие характеристики разрабатываемой антенной системы [7, 8].

1. Постановка задачи

В литературе достаточно подробно рассмотрена теория ММО антенных решеток, но практически отсутствуют как сами имитационные модели, так и результаты имитационного моделирования [2–4].

Целью этой работы является создание и апробация имитационной программной модели для разработки и отладки антенных решеток ММО РЛС различных конфигураций. Такая модель позволит изучить различные варианты конфигураций реальных приемных, передающих и виртуальных антенных решеток, объединенных алгоритмом ММО обработки, а также проверить их работоспособность для различных типов сигналов.

2. Алгоритм моделирования

Имитационная модель должна достоверно отображать процессы, происходящие в замещаемом объекте [7, 8]. В данном случае разрабатываемая модель должна соответствовать принципу действия ММО антенных решеток.

Рассмотрим кратко принцип действия ММО антенных решеток и определим набор математических соотношений, который будет использоваться в разрабатываемой имитационной модели. Далее сформируем алгоритм работы модели.

Пусть имеются две антенные системы, одна из которых является передающей, другая – принимающей. В результате ММО обработки из них формируется виртуальная антенная решетка. Координаты элементов виртуальной решетки могут быть рассчитаны по известному из литературы [1–6] выражению:

$$\begin{aligned}Xv_{k,p} &= Xr_k + Xt_p; \\ Yv_{k,p} &= Yr_k + Yt_p,\end{aligned}\tag{1}$$

где (Xr_k, Yr_k) – координаты реального приемника под номером $k \in 1 \dots N_{Rx}$; N_{Rx} – количество реальных приемников; (Xt_p, Yt_p) – координаты реального передатчика под номером $p \in 1 \dots N_{Tx}$; N_{Tx} – количество реальных передатчиков, а $(Xv_{k,p}, Yv_{k,p})$ – координаты виртуального элемента решетки, соответствующего паре приемника и передатчика под номерами k и p соответственно.

При формировании антенной решеткой направленного излучения в заданном угловом направлении используется классический метод [9, 10], заключающийся во внесении в излучаемые каждым передатчиком сигналы фазового сдвига, обеспечивающего синфазное суммирование электромагнитных волн вдоль заданного углового направления. Одно из ключевых отличий классической решетки от ММО антенн заключается в использовании ортогональных сигналов: каждый передатчик излучает соответствующий только ему сигнал, представленный его комплексной огибающей (КО). Таким образом, все излучаемые сигналы взаимно ортогональны. Для моделирования выбрано самое простое в программной реализации ортогональное разделение сигналов во временной области.

Такой способ ортогонализации означает, что сигналы, подводимые ко всем передающим элементам, не пересекаются во временной области. Ненулевому значению временной реализации одного из сигналов соответствуют нулевые значения временных реализаций всех остальных сигналов. Пример последовательности шестнадцати одинаковых по форме радиоимпульсов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), разделенных таким способом, приведен на рис. 1, а. Порядковый номер сигнала в последовательности соответствует порядковому номеру передающего элемента. На рис. 1, б показан только сигнал, соответствующий передатчику под номером 2. На рис. 1, в этот сигнал представлен более детально.

Выражение, определяющее суммарный сигнал, излучаемый в заданном направлении, при условии равномерности амплитудного распределения по антенной решетке и $\beta = \frac{2\pi}{c} f_0$, где c – скорость распространения электромагнитных волн, а f_0 – рабочая частота РЛС, является классическим [9, 10] и имеет следующий вид:

$$st_{\Sigma}(\alpha, \theta, t) = \sum_{p=1}^{N_{Tx}} At_p(t) F_p(\alpha, \theta) \times \exp \left[j\beta (Xt_p \sin(\alpha) + Yt_p \sin(\theta)) \right], \quad (2)$$

где $st_{\Sigma}(\alpha, \theta, t)$ – КО суммарного излученного сигнала в направлении (α, θ) в координатах углов Азимут и Угол места соответственно; $At_p(t)$ – КО ортогонального сигнала, излучаемого передатчиком под номером p ; j – мнимая единица, а $F_p(\alpha, \theta)$ – значение ДН передающего элемента под номером p для направления (α, θ) .

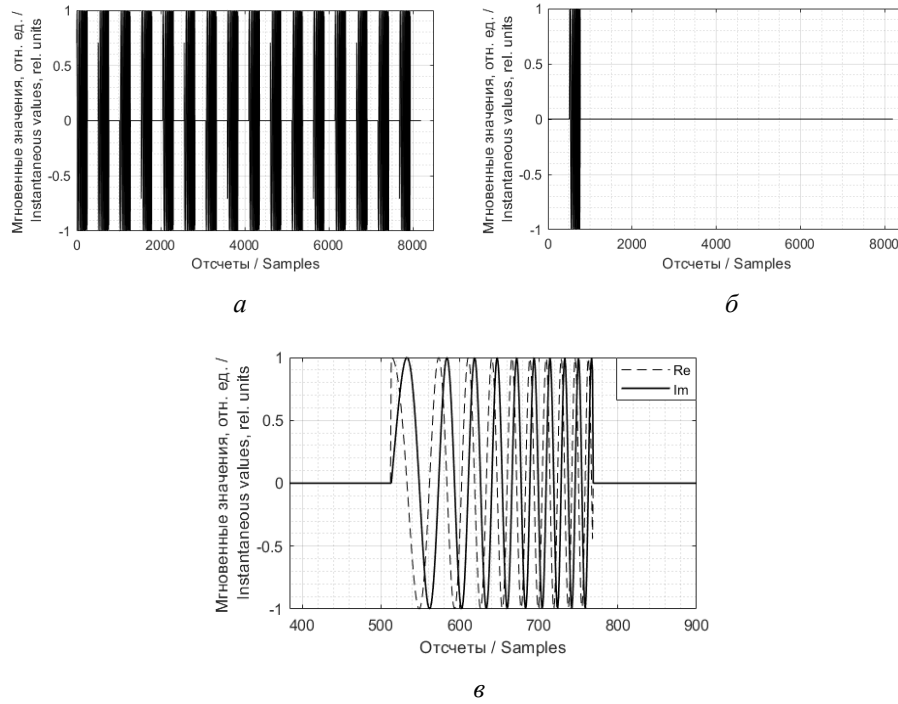


Рис. 1 – Ортогональные сигналы для ММО антенной решетки

Fig. 1 – Orthogonal signals in the MIMO antenna system

В радиолокационных системах применяются радиосигналы с различными видами комплексной огибающей [9, 10]. Типовые виды комплексных огибающих: монохроматический сигнал, видеоимпульс, сигналы с амплитудной, фазовой манипуляцией, ЛЧМ-сигналы и др. Разработанная имитационная модель допускает применение двух видов КО зондирующих сигналов: короткий видеоимпульс (или комплексное число) и ЛЧМ-сигнал.

На каждый реальный приемный элемент ММО антенной решетки поступает сигнал $st_{\Sigma}(\alpha, \theta, t)$, отраженный от объекта. Фазировка сигналов в приемниках осуществляется классическим способом – путем внесения в сигналы фазового сдвига, обеспечивающего синфазное суммирование принятых сигналов для заданного углового направления на источник излучения. При условии равномерности амплитудного распределения по набору приемных элементов сигнал $sr_k(\alpha, \theta, t)$ на выходе k -го приемного элемента определяется следующим выражением:

$$sr_k(\alpha, \theta, t) = st_{\Sigma}(\alpha, \theta, t)G_k(\alpha, \theta) \times \exp[-j\beta(Xr_k \sin(\alpha) + Yr_k \sin(\theta))], \quad (3)$$

где $G_k(\alpha, \theta)$ – значение ДН приемного элемента под номером k в направлении (α, θ) .

Ортогональность каждого из сигналов, излученных передатчиками, позволяет на приемной стороне извлечь дополнительную информацию о местоположении передающих элементов из $sr_k(\alpha, \theta, t)$. Для этого необходимо выделить ортогональные сигналы из принятой смеси (3).

Выделение сигналов, каждый из которых соответствует своему излучающему элементу, происходит при помощи набора согласованных фильтров. Сигнал на выходе фильтра под номером p представляет собой выделенный из смеси ортогональный сигнал под номером p , соответствующий p -му передающему элементу:

$$\Phi_{k,p}(sr_k(\alpha, \theta, t)) = \widehat{At}_{k,p}(t),$$

где $\Phi_{k,p}(sr_k(\alpha, \theta, t))$ – операция выделения из принятой смеси ортогонального сигнала под номером p в приемном канале под номером k . Результатом операции является сигнал $\widehat{At}_{k,p}(t)$, соответствующий передающему элементу под номером p .

После выделения ортогональных сигналов каждый из них подвергается дополнительной обработке. В выделенный сигнал вносится фазовый сдвиг, пропорциональный разности координат приемника и каждого из передатчиков, сигналы от которых были успешно выделены из принятой смеси. После этого выделенные и сдвинутые по фазе сигналы снова суммируются.

Таким образом, принятые сигналы перед суммированием приобретают дополнительные фазовые сдвиги, обусловленные известной информацией о расположении передатчиков. Это эквивалентно улучшению направленных свойств ММО антенной решетки по сравнению с классической, ограниченной только суммированием после (3). Выражение, определяющее сигнал на выходе устройства дополнительной обработки $sm_{k,p}(\alpha; \theta; t)$, имеет следующий вид:

$$sm_{k,p}(\alpha, \theta, t) = \Phi_{k,p}(sr_k(\alpha, \theta, t)) \times \exp \left[-j\beta \left((Xt_p - Xr_k) \sin(\alpha) + (Yt_p - Yr_k) \sin(\theta) \right) \right]. \quad (4)$$

Сигнал $sm_{k,p}(\alpha, \theta, t)$ относится к реальному приемнику под номером k и находится в канале ортогонального сигнала под номером p (соответствует передатчику под номером p).

Далее осуществляется суммирование всех выделенных ортогональных сигналов в пределах одного канала приемника. После осуществляется суммирование сигналов со всех приемников. Таким образом, выражение для суммарного принятого сигнала на выходе антенной решетки для заданного углового направления на источник излучения (α, θ) может быть представлено в виде

$$Ssum(\alpha, \theta, t) = \sum_{k=1}^{N_{Rx}} \sum_{p=1}^{N_{Tx}} sm_{k,p}(\alpha, \theta, t). \quad (5)$$

Объединим выражения (3)–(5), получив выражение (6):

$$Ssum(\alpha, \theta, t) = \sum_{k=1}^{N_{Rx}} \sum_{p=1}^{N_{Tx}} \Phi_{k,p} (st_{\Sigma}(\alpha, \theta, t) G_k(\alpha, \theta)) \times \\ \times \exp \left[-j\beta (Xt_p \sin(\alpha) + Yt_p \sin(\theta)) \right]. \quad (6)$$

Для оценки диаграммы направленности выражение (6) должно быть преобразовано. Преобразование необходимо для оценки мощности излучения, принимаемого с побочных угловых направлений. Для сохранения возможности выделения информации о передатчиках фазовый сдвиг в выражении (3) должен быть сохранен без изменений. Фазовый сдвиг, соответствующий рассматриваемому угловому направлению (α_a, θ_b) при электронном сканировании, вносится в выражение (4). С учетом необходимых преобразований запишем получившееся выражение:

$$Ssum_{a,b}(\alpha, \theta, t) = \sum_{k=1}^{N_{Rx}} \sum_{p=1}^{N_{Tx}} \Phi_{k,p} (st_{\Sigma}(\alpha, \theta, t) G_k(\alpha, \theta)) \times \\ \times \exp \left[-j\beta \left(\left[Xr_k \sin(\alpha) + ((Xt_p - Xr_k) \sin(\alpha_b)) \right] + \left[Yr_k \sin(\theta) + ((Yt_p - Yr_k) \sin(\theta_b)) \right] \right) \right]. \quad (7)$$

Выражения (2)–(7) полностью описывают операции над сигналами, выполняемые в антенной решетке ММО РЛС, и позволяют осуществить ее моделирование и оценку диаграммы направленности для задаваемого расположения приемных и передающих элементов.

Рис. 2 представляет собой иллюстрацию к рассмотренному выше принципу работы ММО антенной решетки. Передающие и приемные элементы на нем обозначены как Tx и Rx соответственно.

Укрупненно предлагаемый алгоритм имитационного моделирования выглядит следующим образом.

1. Для заданной конфигурации излучающих элементов и типа комплексной огибающей сигнала, подводимого к каждому из этих элементов, осуществляется расчет по выражению (2) комплексной огибающей, характеризующей излучаемый сигнал.

2. Для каждого приемного элемента осуществляется расчет сигнала на его выходе по выражению (3).

3. Для каждого приемного канала осуществляется выделение по выражению (4) из принятой смеси ортогональных сигналов, соответствующих каждому своему передающему элементу антенной решетки.

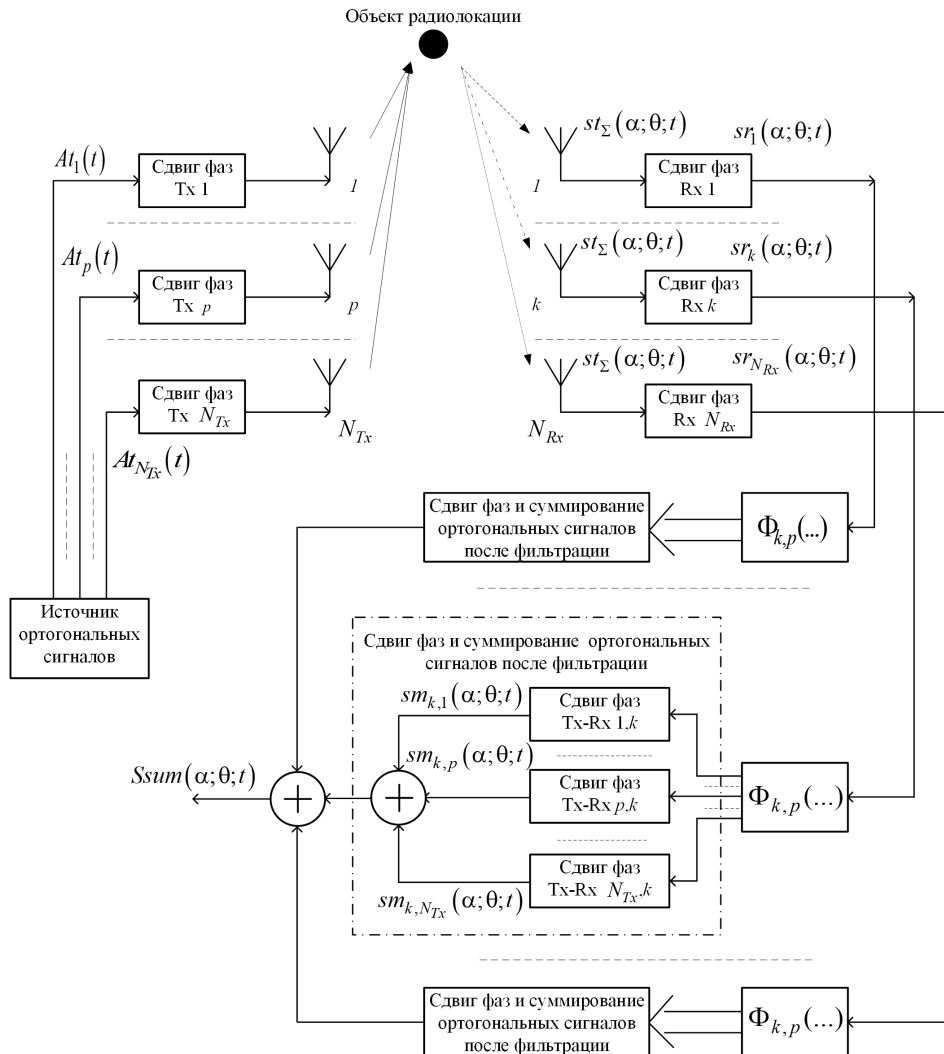


Рис. 2 – Иллюстрация к принципу работы ММО антенной решетки

Fig. 2 – A schematic diagram of MIMO antenna array operation

4. По всем приемным элементам проводится сложение принятых и выделенных на предыдущем шаге ортогональных сигналов согласно выражению (5).

В результате выполнения алгоритма определяется суммарный сигнал на выходе виртуальной антенной решетки, прошедший ММО обработку.

При оценке диаграммы направленности ММО антенной решетки приведенные выше пункты алгоритма повторяются для каждого рассматриваемого углового направления. Этой процедуре соответствует выражение (7).

Стоит отметить, что направления (α, θ) , соответствующие передаче и приему в выражениях (2)–(7), могут отличаться и задаваться при моделировании разными значениями.

3. Результаты моделирования

Для апробации имитационной модели ММО антенной решетки необходимо подтвердить адекватность результатов моделирования. Воспользуемся следующими соображениями.

Фактически, ДН ММО антенной решетки формируется ее виртуальной апертурой. Элементы, составляющие виртуальную апертуру, образуют виртуальную классическую антенную решетку. ДН такой виртуальной классической решетки должна совпадать с ДН ММО антенной решетки. Это является критерием адекватности моделирования. Проведем сравнение диаграмм направленности, формируемых классической и ММО антенными решетками с одинаковым расположением реальных и виртуальных элементов соответственно, с целью подтвердить адекватность моделирования.

Рассмотрим простую конфигурацию антенной решетки ММО РЛС, составленной из двух непересекающихся линеек передатчиков и приемников, которые обозначены квадратными и круглыми маркерами соответственно на рис. 3. Количество передатчиков равно 16. Количество приемников равно 32. Элементы расположены с полуволновым шагом при рабочей частоте антенны в $f_0 = 10$ ГГц вдоль декартовых осей координат OX и OY и являются изотропными. На приемной стороне методы обработки сигналов ММО антенн позволяют сформировать виртуальную антенную решетку с элементами, координаты которых равны суммам координат каждой реальной пары приемник–передатчик. Положения виртуальных элементов названы Vx и показаны маркерами-крестами на рис. 3.

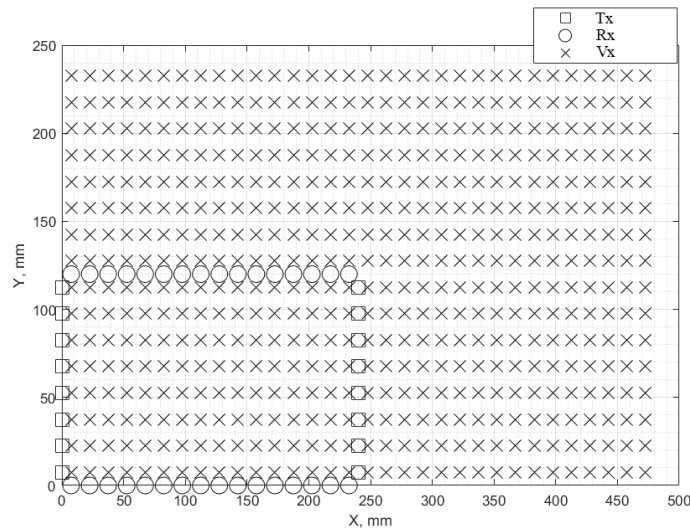


Рис. 3 – Карта расположения элементов антенной решетки

Fig. 3 – Antenna array element arrangement

Определим ДН классической антенной решетки, местоположение элементов которой совпадает с элементами виртуальной апертуры ММО

антенной решетки, изображенной на рис. 3 маркерами-крестами. Методы моделирования классической антенной решетки при заданном местоположении ее элементов и оценки ее диаграммы направленности широко представлены в литературе [9, 10]. На рис. 4 приведены ДН классической антенной решетки для направлений главного луча $(0, 0)^\circ$ и $(30, 30)^\circ$. Параметры КО зондирующего сигнала: ЛЧМ, диапазон перестройки частоты: 2...12 МГц, количество отсчетов равно 2056. Все элементы классической решетки изотропные.

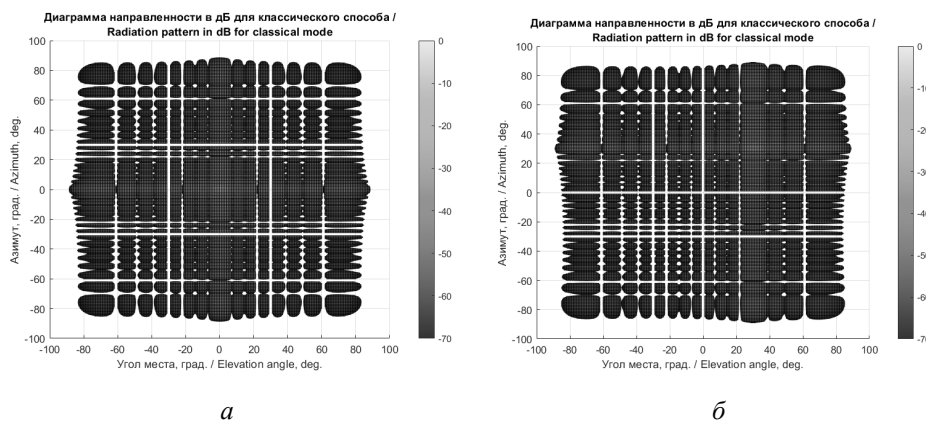


Рис. 4 – Диаграммы направленности для классической антенной решетки:
а – для направления главного луча $(0, 0)^\circ$; б – для направления $(30, 30)^\circ$

Fig. 4 – Radiation patterns of a conventional antenna array:
a is for the direction of the main beam $(0, 0)^\circ$; b is for the direction $(30, 30)^\circ$

Представленные на рис. 4 диаграммы направленности будут приняты за эталонные.

Рассмотрим примеры моделирования антенной решетки ММО радара с конфигурацией, представленной на рис. 3, для двух типов КО. Первый тип – короткий видеоимпульс. Такой тип КО с точки зрения моделирования является самым простым, расчеты для него требуют наименьших вычислительных затрат. Второй тип – ЛЧМ-сигнал. Такой тип сигналов является распространенным для радиолокационных приложений [9–12].

Совпадение результатов моделирования антенных решеток ММО РЛС для разных типов сигналов позволит в дальнейшем применять для оценки формы диаграммы направленности по заданной конфигурации приемных и передающих элементов самый простой из них с точки зрения скорости вычислений – короткий видеоимпульс.

3.1. Комплексная огибающая в виде короткого видеоимпульса

Первый рассматриваемый вид КО сигнала – короткий видеоимпульс. Сигнал представляет собой один отсчет с комплексным значением. Так как сдвиг фазы сигнала эквивалентен умножению его отсчетов на комплексное число, то даже такой простой вид КО позволяет оценить фазовые соотношения сигналов в элементах антенной решетки и ее диаграмму

направленности. Короткий видеоимпульс в виде единственного отсчета позволяет обеспечить наибольшую скорость вычислений среди остальных типов сигналов.

Адекватность моделирования для такого типа КО означает адекватность моделирования для более сложных видов комплексных огибающих на основе видеоимпульсов: амплитудно-импульсная модуляция, фазовая манипуляция, коды Баркера и т.п.

На рис. 5 приведены полученные в результате моделирования диаграммы направленности ММО антенной решетки с параметрами, указанными ранее, для направлений главного луча $(0, 0)^\circ$ и $(30, 30)^\circ$. Все элементы ММО решетки были приняты изотропными.

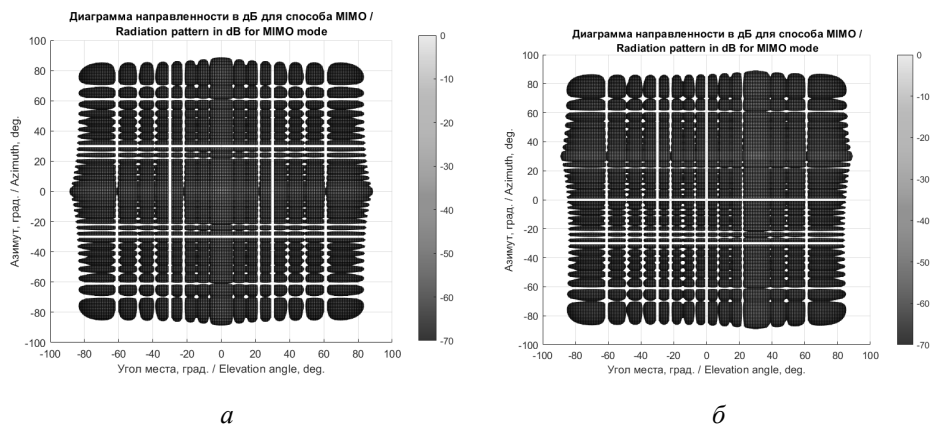


Рис. 5 – Диаграммы направленности для ММО антенной решетки при комплексной огибающей сигнала «короткий видеоимпульс»:

a – для направления главного луча $(0, 0)^\circ$; b – для направления $(30, 30)^\circ$.

Fig. 5 – Radiation patterns of a MIMO Antenna Array Excited by a short video pulse envelope signal:

a is for the direction of the main beam $(0, 0)^\circ$; b is for the direction $(30, 30)^\circ$

По рис. 4 и 5 очевидно, что ДН ММО антенной решетки полностью соответствует ДН эквивалентной ей виртуальной классической антенной решетки. Относительная разность диаграммы направленности ММО антенной решетки и реальной, положение элементов которой совпадает с положением виртуальных элементов, не превышает 1 %. Это означает адекватность применения короткого видеоимпульса для моделирования антенных решеток ММО РЛС.

3.2. Комплексная огибающая в виде ЛЧМ-сигнала

Другой рассматриваемый вид комплексной огибающей – сигнал с линейной частотной модуляцией. Сигнал представляет собой выборку отсчетов, соответствующих колебанию, частота которого изменяется пропорционально порядковому номеру отсчета по линейному закону.

Адекватность моделирования для такого типа КО означает адекватность моделирования для других видов комплексных огибающих с внут-

риимпульсной модуляцией и цифровых схем модуляции, например, OFDM.

Сигнал представляет собой комплексное колебание с частотой, увеличивающейся с течением времени в полосе $f_{LFM} = 2...12$ МГц. Количество отсчетов, приходящихся на один передающий элемент при временном разделении, равно 512. Из них 256 отсчетов заняты ненулевыми мгновенными значениями сигнала. На рис. 6, а представлена временная реализация КО излученного передающей антенной системой ЛЧМ-сигнала. На рис. 6, б выделен и представлен детально только сигнал второго передатчика.

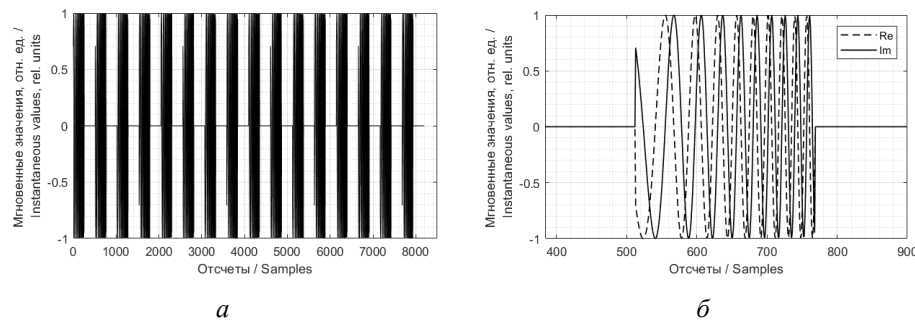


Рис. 6 – ЛЧМ-сигнал для ММО антенной решетки:

a – излученный сигнал; *б* – детальное изображение временной реализации сигнала второго передающего элемента

Fig. 6 – LFM signal for a MIMO antenna array:

a is a radiated signal; *b* is a detailed time-domain waveform of the second TX element

На рис. 7 представлены диаграммы направленности ММО решетки для КО в виде ЛЧМ-сигнала с приведенными выше параметрами, для направлений главного луча $(0, 0)^\circ$ и $(30, 30)^\circ$. Все элементы ММО решетки были приняты изотропными.

По рис. 4 и 7 очевидно, что ДН ММО антенной решетки полностью соответствует ДН эквивалентной ей виртуальной классической антенной решетки. Относительная разность диаграммы направленности ММО антенной решетки и реальной антенной решетки, положение элементов которой совпадает с положением виртуальных элементов, не превышает 1 %. Это означает адекватность применения короткого видеоимпульса для моделирования антенных решеток ММО РЛС.

Как видно из рис. 4–7, диаграммы направленности для виртуальной классической и ММО антенных решеток совпадают с большой точностью при всех типах сигналов.

Результаты моделирования показывают, что рассматриваемый метод моделирования ММО антенных решеток является работоспособным, а дальнейшие исследования можно проводить для сигнала типа «короткий видеоимпульс», что существенно упрощает моделирование за счет уменьшения размерности массивов обрабатываемых данных и увеличения скорости расчетов.

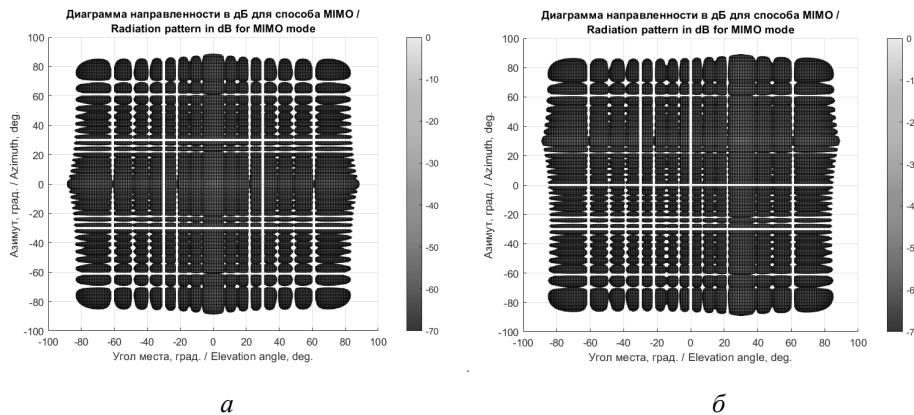


Рис. 7 – Диаграммы направленности для ММО антенной решетки при КО в виде ЛЧМ сигнала:

а – для направления главного луча $(0, 0)^\circ$; *б* – для направления $(30, 30)^\circ$

Fig. 7 – Radiation Patterns of a MIMO Antenna Array Excited by a LFM Envelope Signal:

a is for the direction of the main beam $(0, 0)^\circ$; *b* is for the direction $(30, 30)^\circ$

Закключение

Разработан алгоритм имитационного моделирования антенных решеток ММО радаров, приведены математические соотношения, на которых он основан. Разработанный алгоритм позволяет моделировать ММО антенные решетки с произвольными конфигурациями их элементов и различными типами комплексных огибающих применяемых сигналов.

Получены результаты моделирования в виде диаграмм направленности ММО антенных решеток для двух типов комплексных огибающих сигналов: короткий видеоимпульс и ЛЧМ-сигнал. Результаты моделирования показали, что разработанная имитационная модель ММО антенной решетки является адекватной, а дальнейшие исследования можно проводить для комплексной огибающей в виде короткого видеоимпульса, что существенно упростит моделирование за счет снижения требуемых вычислительных мощностей.

На основе разработанной имитационной модели в дальнейшем будет осуществлена разработка ММО антенных решеток различных конфигураций, рассмотрено применение широкополосных сигналов, применены различные методы параметрического спектрального оценивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Черняк В.С.** Многопозиционные радиолокационные системы на основе ММО РЛС // Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – № 8. – С. 29–45.
2. **Li J., Stoica P.** MIMO radar signal processing / ed. by J. Li, P. Stoica. – Hoboken, NJ: J. Wiley & Sons, 2009. – 472 p. – DOI: 10.1002/9780470391488.
3. **Bergin J., Guerci J.** MIMO radar: Theory and application. – Boston: Artech House, 2018. – 231 p.

4. MIMO radar; An idea whose time has come / E. Fishler, A. Haimovich, R. Blum, D. Chizhik, L. Cimini, R. Valenzuela // *Proceedings of the 2004 IEEE Radar Conference*, Philadelphia, PA, 2004. – IEEE, 2004. – P. 71–78. – DOI: 10.1109/NRC.2004.1316398.
5. Massive MIMO radar for target detection / S. Fortunati, L. Sanguinetti, F. Gini, M.S. Greco, B. Himed // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 2020. – Vol. 68. – P. 859–871. – DOI: 10.1109/TSP.2020.2967181.
6. **Grove R.L.** MIMO radar systems and algorithms – Imperfections and calibration. – Technical University of Denmark, 2022. – 189 p.
7. **Скурихин В.И., Шифрин В.Б., Дубровский В.В.** Математическое моделирование. – Киев: Техніка, 1983. – 270 с.
8. **Shannon R.E.** Systems simulation: The art and science. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1975. – 387 p.
9. **Skolnik M.I.** Radar handbook. – 3ed ed. – New York: McGraw Hill, 2008. – 1352 p.
10. Радиозлектронные системы: основы построения и теория / под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 508 с.
11. **Захарик А.П., Омелянчук Е.В., Мальцева В.А.** Использование ЛЧМ-сигналов для решения задач локального позиционирования в режиме реального времени // *Перспективы развития информационных технологий*. – 2015. – № 25. – С. 13–17.
12. **Мухамадиев С.М., Рогожников Е.В., Дмитриев Э.М.** Исследование помехоустойчивости системы связи с линейной частотной модуляцией // *Электронные средства и системы управления*. – 2020. – № 1-1. – С. 21–24.

A MATHEMATICAL MODEL FOR THE CALCULATIONS OF THE ANTENNA ARRAY RADIATION PATTERN FOR THE MIMO RADAR

Podkopyayev A.O., Artyushenko V.V., Stepanov M.A., Sokolov V.S.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The article presents the results of the development and verification of a simulation model of a MIMO radar antenna array. The relevance of this study is determined by the growing adoption of MIMO technology in radar systems, which allows for the creation of a virtual aperture with enhanced directivity using a fewer number of physical elements. The objective of the work is to develop a universal software model for the analysis and synthesis of MIMO arrays of various configurations, supporting different types of transmit waveforms. The model is based on a mathematical framework that describes the formation of the virtual array, the transmission of orthogonal signals, their receipt and processing with matched filters, and subsequent coherent summation. The simulation algorithm involves a step-by-step calculation of the transmitted signal, modeling the received signal at each element, extraction of orthogonal components, and final summation to obtain the radiation pattern. The key results were obtained for two types of complex envelopes: a short video pulse and an LFM signal. A comparison was made between the radiation pattern of the simulated MIMO array and a reference convention-

al array with elements positioned according to the calculated locations of the virtual aperture elements. The results demonstrated a complete match of the radiation patterns with a relative error not exceeding 1 %, confirming the model's adequacy. It is concluded that the computationally simplest signal – the short video pulse – can be used for further research into MIMO antenna characteristics employing the proposed method. The developed simulation model is intended for use in designing and optimizing MIMO radar antenna array configurations.

Keywords: MIMO Radar, antenna array, simulation modeling, virtual aperture, radiation pattern, LFM signal, matched filter.

DOI: 10.17212/1727-2769-2025-3-29-44

REFERENCES

1. Chernyak V.S. Mnogopozitsionnye radiolokatsionnye sistemy na osnove MIMO RLS [Multisite radar systems based on MIMO radars]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki = Achievements of Modern Radioelectronics*, 2012, no. 8, pp. 29–45. (In Russian).
2. Li J., Stoica P., eds. *MIMO radar signal processing*. Hoboken, NJ, J. Wiley & Sons, 2009. 472 p. DOI: 10.1002/9780470391488.
3. Bergin J., Guerci J. *MIMO radar: Theory and application*. Boston, Artech House, 2018. 231 p.
4. Fishler E., Haimovich A., Blum R., Chizhik D., Cimini L., Valenzuela R.. MIMO radar; An idea whose time has come. *Proceedings of the 2004 IEEE Radar Conference*, Philadelphia, PA, 2004, pp. 71–78. DOI: 10.1109/NRC.2004.1316398.
5. Fortunati S., Sanguinetti L., Gini F., Greco M.S., Himed B. Massive MIMO radar for target detection. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, vol. 68, pp. 859–871. DOI: 10.1109/TSP.2020.2967181.
6. Grove R.L. *MIMO radar systems and algorithms – Imperfections and calibration*. Technical University of Denmark, 2022. 189 p.
7. Skurikhin V.I., Shifrin V.B., Dubrovskii V.V. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical modeling]. Kiev, Tekhnika Publ., 1983. 270 p. (In Russian).
8. Shannon R.E. *Systems simulation: The art and science*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1975. 387 p.
9. Skolnik M.I. *Radar handbook*. 3ed ed. New York, McGraw Hill, 2008. 1352 p.
10. Shirman Ya.D., ed. *Radioelektronnye sistemy: osnovy postroeniya i teoriya* [Radio-electronic systems: Fundamentals and theory]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2007. 508 p. (In Russian).
11. Zakharik A.P., Omel'yanchuk E.V., Mal'tseva V.A. *Ispol'zovanie LChM-signalov dlya resheniya zadach lokal'nogo pozitsionirovaniya v rezhime real'nogo vremeni* [Applying the LFM-signal for solving the problems of real-time localization]. *Perspektivy razvitiya informatsionnykh tekhnologii = Prospects for the development of information technologies*, 2015, no. 25, pp. 13–17.
12. Mukhamadiev S.M., Rogozhnikov E.V., Dmitriev E.M. Issledovanie pomekhoustoichivosti sistemy svyazi s lineinoi chastotnoi modulyatsiei [The studying of the interference immunity of the communication system with linear frequency modulation]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya = Proceedings of the International Scientific Conference on Electronic Devices and Control Systems*, 2020, no. 1-1, pp. 21–24.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Подкопаев Артемий Олегович – родился в 1994 году, канд. техн. наук, доцент кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: антенные решетки, имитационное и полунатурное моделирование радиотехнических систем. Опубликовано более 15 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: podkopaev@corp.nstu.ru).

Podkopayev Artemy Olegovich (b. 1994) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the Department of Radio Receiving and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on antenna arrays, simulation and semi-realistic modelling of radio technical systems. He is the author of over 20 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: podkopaev@corp.nstu.ru).



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

Artyushenko Vadim Valeryevich (b. 1992) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the Department of Radio Receiving and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on mathematical simulation and radio signal simulation. He is the author of more than 20 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: artyushenko@corp.nstu.ru).



Степанов Максим Андреевич – родился в 1982 году, д-р техн. наук, заведующий кафедрой радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: имитационное, полунатурное моделирование радиоэлектронной обстановки в реальном масштабе времени; антенные решетки и техника СВЧ. Опубликовано более 140 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: m.stepanov@corp.nstu.ru)

Stepanov Maksim Andreevich (b. 1982) – Doctor of Sciences (Eng.), Head of the Department of Radio Receiving and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on simulational and semi-realistic modelling of the electronic environment in the real-time scales, antenna array and microwave technology. He is the author of more than 140 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: m.stepanov@corp.nstu.ru).



Соколов Вадим Сергеевич – родился в 1997 году, ассистент кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: антенны, антенные решетки и техника СВЧ. Опубликовано более 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: vady.sokol@gmail.com).

Sokolov Vadim Sergejevich (b. 1997) , assistant professor at the Department of Radio Receiving and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on antennas, antenna arrays and microwave technology. He is the author of more than 10 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, E-mail: vady.sokol@gmail.com).

*Статья поступила 02 августа 2025 г.
Received August 02, 2025*

To Reference:

Podkopayev A.O., Artyushenko V.V., Stepanov M.A., Sokolov V.S. Matematicheskaya model' dlya rascheta diagrammy napravlenosti antennoi reshetki MIMO RLS [A mathematical model for the calculations of the antenna array radiation pattern for the MIMO radar]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2025, no. 3 (68), pp. 29–44. DOI: 10.17212/1727-2769-2025-3-29-44.