

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2023.7.4.004

УДК 621.396.677

Применение генетического алгоритма синтеза одномерных прореженных антенных решеток для формирования двумерных прореженных ММО антенных решеток

В. С. Соколов✉, М. А. Степанов,
В. В. Артюшенко, А. О. Подкопаев

Новосибирский государственный технический университет, Россия,
630073, г. Новосибирск, Проспект Карла Маркса, 20

✉ vady.sokol@gmail.com

Аннотация

Рассмотрена возможность применения прореженных классических линейных антенных решеток для синтеза на их основе двумерных прореженных ММО антенных решеток. Рассмотрена ММО антенная решетка, приемные и передающие элементы которой расположены на двух взаимно ортогональных линиях. На примере этой решетки показано, что диаграмма направленности ее виртуальной апертуры обладает свойством делимости пространственных переменных. Это позволяет для линеек приемных и передающих элементов использовать расположение элементов прореженной классической линейной антенной решетки. Показано, что прореженная ММО антенная решетка может формировать диаграмму направленности с более низким уровнем боковых лепестков, чем полная решетка, при сохранении ширины главного лепестка неизменной. Приведена зависимость, позволяющая определить пиковый уровень боковых лепестков двумерной прореженной ММО антенной решетки при заданном коэффициенте прореживания.

Ключевые слова

прореженная антенная решетка, виртуальный массив ММО, виртуальная апертура, низкий уровень боковых лепестков, диаграмма направленности, амплитудное распределение

Для цитирования

Соколов В. С., Степанов М. А., Артюшенко В. В., Подкопаев А. О. Применение генетического алгоритма синтеза одномерных прореженных антенных решеток для формирования двумерных прореженных ММО

антенных решеток. *Ural Radio Engineering Journal*. 2023;7(4):423–440.
DOI: 10.15826/urej.2023.7.4.004.

Application of Genetic Algorithm for Synthesizing One-dimensional Thinned Antenna Arrays to form Two-dimensional Thinned MIMO Antenna Arrays

V. S. Sokolov✉, M. A. Stepanov,
V. V. Artyushenko, A. O. Podkopaev

Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk,
630073, Russia

✉ vady.sokol@gmail.com

Abstract

The possibility of using thinned classical linear antenna arrays to synthesize two-dimensional thinned MIMO antenna arrays on their basis is considered. The MIMO antenna array which receiving and transmitting elements are located on two mutually orthogonal lines is regarded. On the example of this array it is shown that the directivity diagram of its virtual aperture has the property of separability of spatial variables. It allows using the arrangement of elements of a thinned classical linear antenna array for the receiving and transmitting elements lines. It is demonstrated that a thinned MIMO antenna array can form a radiation pattern with a lower level of side lobes than a full array while keeping the width of the main lobe unchanged. The dependence allowing to determine the peak level of side lobes of a two-dimensional thinned MIMO antenna array at a given thinning factor is given.

Keywords

thinned antenna array, MIMO virtual array, virtual aperture, low side lobe, radiation pattern.

For citation

Sokolov V. S., Stepanov M. A., Artyushenko V. V., Podkopaev A. O.
Application of genetic algorithm for synthesizing one-dimensional thinned antenna arrays to form two-dimensional thinned MIMO antenna arrays. *Ural Radio Engineering Journal*. 2023;7(4):423–440. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2023.7.4.004.

Введение

Рассмотрим основную идею функционирования МИМО-радаров [1, 2]. У крупненно МИМО-радар можно представить в виде двух частей: МИМО антенная решетка, состоящая из совокупности передающих (Tx) и приемных (Rx) элементов, и устройство

обработки, позволяющее формировать диаграмму направленности антенной решетки.

ММО антенная решетка состоит из определенного числа передающих (nTx) и приемных (nRx) элементов. Передающий элемент с порядковым номером k расположен в точке с координатами $\{xT_k, yT_k, zT_k\}$. Приемный элемент с номером i расположен в точке с координатами $\{xR_i, yR_i, zR_i\}$. Передающие элементы излучают взаимно ортогональные (независимые) сигналы.

Каждый из приемных элементов одновременно принимает совокупность сигналов, прошедших путь от каждого из передающих модулей до блестящих точек объекта наблюдения и обратно.

Структура приемника является важным элементом, определяющим возможности ММО радаров [3–5]. Как правило, ММО-приемник имеет одинаковую структуру для всех приемных каналов [1, 3, 6]. Сигналы, формируемые на входе каждого из приемных каналов (на приемных антеннах), представляют собой совокупность сигналов, излученных каждым передающим элементом и отраженных от блестящих точек объекта наблюдения.

В каждом канале реализуется набор фильтров, согласованных с сигналом, излучаемым каждым из передающих модулей. Такая обработка позволяет сформировать на выходах приемника сигналы, соответствующие $nTx \cdot nRx$ различным направлениям распространения сигнала. Зная расположение Rx - и Tx -элементов, это позволяет сформировать виртуальный массив из $nTx \cdot nRx$ элементов. Он представляет собой виртуальную апертуру ММО-антенны. Координаты элементов ММО антенной решетки определяются выражениями (1):

$$\begin{cases} xV_{i,k} = xR_i + xT_k; \\ yV_{i,k} = yR_i + yT_k; \\ zV_{i,k} = zR_i + zT_k. \end{cases} \quad (1)$$

Рассчитанные таким образом координаты являются точками расположения фазовых центров элементов виртуального массива ММО-антенны.

Количество выходных приемных каналов определяется произведением числа приемных и передающих элементов. Таким образом даже небольшое количество Rx - и Tx -элементов может приводить к виртуальным апертурам с большим количеством элементов. Большое количество выходных каналов приемника приводит к его техническому усложнению и удорожанию [7]. Это свидетельствует о целесообразности поиска способов размещения Rx - и Tx -элементов, обеспечивающих заданные параметры диа-

граммы направленности ММО антенной решетки при минимальном количестве каналов приемника [8].

Вопрос прореживания классических антенных решеток исследуется с середины прошлого века. Изначально подход был строго статистический [9, 10]. При таком подходе плотность распределения вероятности элементов решетки формируется из непрерывной функции распределения амплитуд. С развитием технологий исследования перешли в среду алгоритмов, основанных на создании популяций, таких как генетический алгоритм [11–14], метод роя частиц [15], алгоритм пчелиной колонии [16] и муравьиный алгоритм [17], метод дифференциальной эволюции [18]. Подобные алгоритмы адаптируют известные эволюционные законы и повадки из животного мира для оптимизации сложных многокритериальных задач.

Уменьшение количества активных излучателей в антенной решетке зачастую приводит к деформации диаграммы направленности — к росту уровня боковых лепестков и расширению главного лепестка [19]. Схематично оцениваемые параметры диаграммы направленности прореженной антенной решетки изображены на рис. 1 [20].

Известно [21], что диаграмма направленности определяется произведением множителя решетки (определяется расположением излучающих элементов) и диаграммы направленности излуча-

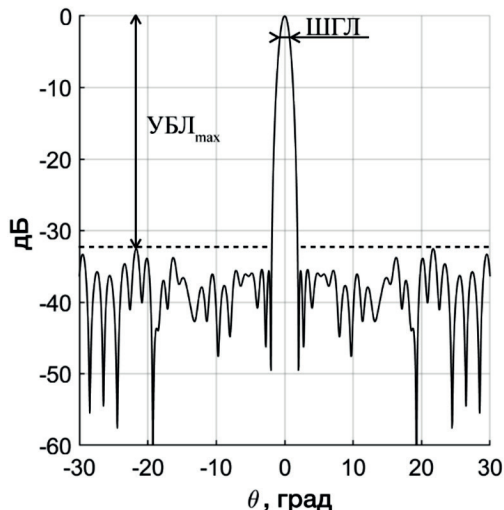


Рис. 1. Оцениваемые параметры диаграммы направленности
Fig. 1. Estimated parameters of thinned antenna array

ющего элемента. При использовании в антенной решетке изотропных излучающих элементов и без учета их взаимного влияния, множитель направленности совпадает с диаграммой направленности [21]. В настоящей работе диаграмма направленности оценивается с учетом этих допущений.

С подобранной согласно необходимым задачам целевой функцией возможно снизить ухудшение параметров, а в некоторых случаях добиться даже лучших параметров, чем у полной антенной решетки. В [11, 12] предложен генетический алгоритм способный синтезировать прореженные линейные классические антенные решетки, близкие по пиковому значению уровня боковых лепестков к максимально достижимому при сохранении неизменной ширины главного лепестка диаграммы направленности.

Целью настоящей работы является оценка возможности применения генетического алгоритма для формирования двумерных разреженных ММО антенных решеток.

Полная двумерная ММО антенная решетка

Рассмотрим полную ММО антенную решетку, составленную из линейки Rx -элементов, расположенной горизонтально, и ортогональной ей линейки Tx -элементов (рис. 2), расположенной вертикально. Количество Rx -элементов равно 76, количество Tx -элементов равно 50. В обеих линейках элементы расположены с шагом равным половине длины волны. Согласно (1) такая конфигурация Rx - и Tx -элементов сформирует двумерный массив из 3800 виртуальных элементов, размер которого по одной координате будет составлять 38 длин волн, а по другой — 25 длин волн. На рис. 2а элементы Rx изображены квадратами, Tx — кружками, виртуальные элементы — крестиками.

Трехмерная диаграмма направленности такой полной ММО антенной решетки изображена на рис. 2б. Цвет индицирует интенсивность излучения в заданном направлении. Более теплые цвета соответствуют более интенсивному излучению. Ширина главного лепестка в плоскости азимута составляет 1,3 градуса, в плоскости угла места — 2 градуса. Уровень боковых лепестков: -13,3 дБ. В целом можно сказать, что параметры диаграммы направленности полной ММО антенной решетки полностью соответствуют классической антенной решетке с таким же расположением элементов и равномерным амплитудным распределением.

Прореженные по одной координате ММО антенные решетки

В [11, 12] предложен генетический алгоритм, синтезирующий прореженную классическую линейную антенную решетку. При-

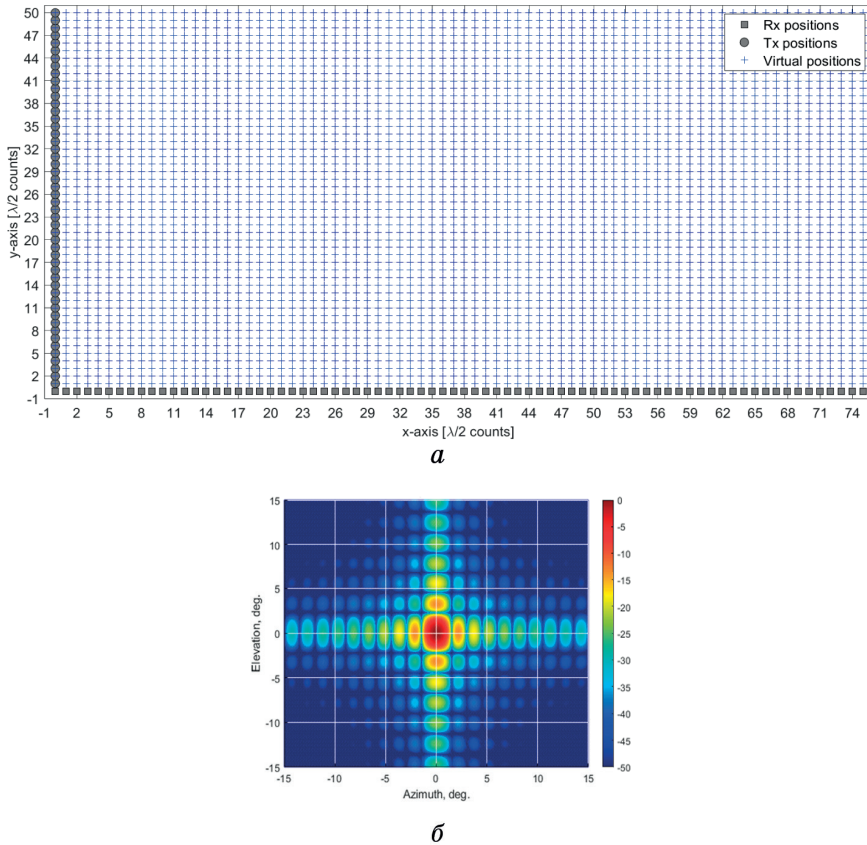


Рис. 2. Полная МИМО антенная решетка ($Rx = 76$, $Tx = 50$):
 а — расположение Rx - и Tx -элементов и виртуальная апертура;
 б — диаграмма направленности

Fig. 2. Full antenna array ($Rx = 76$, $Tx = 50$): а — Rx and Tx element arrangement and virtual aperture; б — radiation pattern

менительно к прореженным классическим антенным решеткам генетический алгоритм используют для синтеза амплитудного распределения. В этом случае амплитудное распределение прореженной антенной решетки определяется выражением:

$$D_{\text{PAP}}(m) = D(m) \cdot D_{\text{ГА}}(m),$$

где $D(m)$ — амплитудное распределение антенной решетки; $D_{\text{ГА}}(m)$ — распределение активных и неактивных излучателей, полученное с использованием генетического алгоритма; m — номер элемента.

Предложенный в [11, 12] алгоритм основывается на принципе представления распределения активных и неактивных излучате-

лей антенных решеток в бинарном виде. Равенство $D_{ГА}(m)$ единице определяет активный m -й излучатель, нулю — не активный.

Применительно к ММО антенным решеткам полученное распределение активных элементов ($D_{ГА}(m)$) определяет местоположение Rx - или Tx -элементов.

Рассмотрим ММО антенную решетку, одна из линеек элементов которой является прореженной, а вторая остается полной.

Для этого генетическим алгоритмом синтезированы две прореженные антенные решетки с коэффициентом прореживания, определяемым отношением количества не активных элементов прореженной антенной решетки к количеству элементов полной, равным $k = 0,25$. В [20] показано, что при краевом прореживании с $k = 0,25$ одномерные антенные решетки с равномерным амплитудным распределением имеют минимальный уровень боковых лепестков.

Первая решетка соответствует прореженному массиву Rx . Для этого массива полная решетка составляет 76 элементов, расположенных с шагом равным половине длины волны. Прореженная решетка содержит 58 элементов. Вторая полная антенная решетка соответствует прореженному массиву Tx . Полная решетка содержит 50 элементов, расположенных с шагом равном половине длины волны. Прореженная решетка содержит 40 элементов. В обоих случаях использовалось краевое прореживание, при котором в центре решетки остается непрореженная область. Как отмечалось в [20], в сравнении с полностью случайным прореживанием краевое обеспечивает более низкий уровень боковых лепестков. Активные (единицы) и не активные (нули) элементы прореженных антенных решеток и соответствующие им диаграммы направленности представлены на рис. 3 для линейки элементов Rx и рис. 4 для линейки элементов Tx .

На рисунках видно, что прореживание антенных решеток приводит к снижению уровня боковых лепестков более чем на 5 дБ. Ширина главного лепестка в плоскости азимута и угла места изменяется не более чем на 0,1 градуса.

Прореженные антенные решетки использовались для формирования двумерной ММО антенной решетки. Решетка из 58 элементов определяла конфигурацию Rx -элементов, из 40 — конфигурацию Tx -элементов.

На рис. 5а представлен пример виртуальной ММО антенной решетки с прореженными Rx -элементами и полной линейкой Tx -элементов. В результате получили прореженный по одной координате массив из 2 900 виртуальных элементов, соответствующий апертуре ММО антенной решетки. На рис. 5б представлена диаграмма направленности антенной решетки с таким распре-

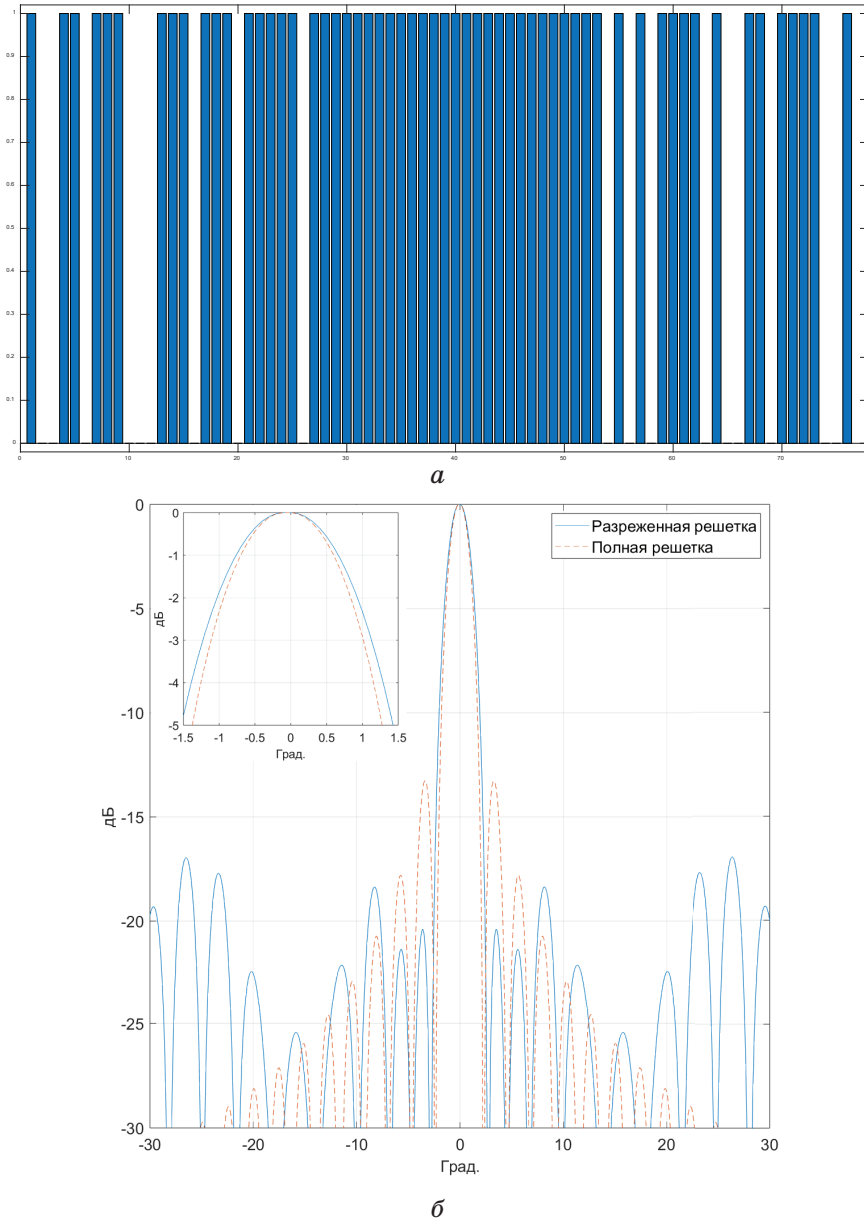


Рис. 3. Прореженная линейная антенная решетка, соответствующая элементам R_x : a — распределение элементов; b — множитель решетки
Fig. 3. Thinned linear antenna array corresponding to R_x elements:
 a) Element distribution; b) array multiplier

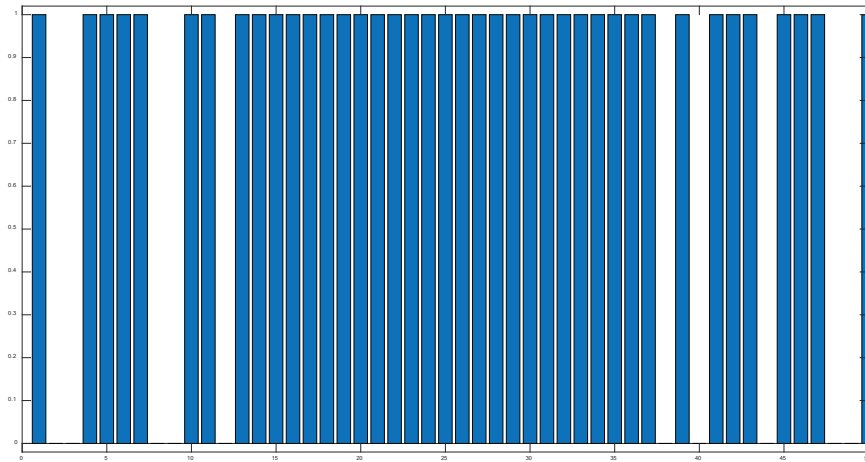
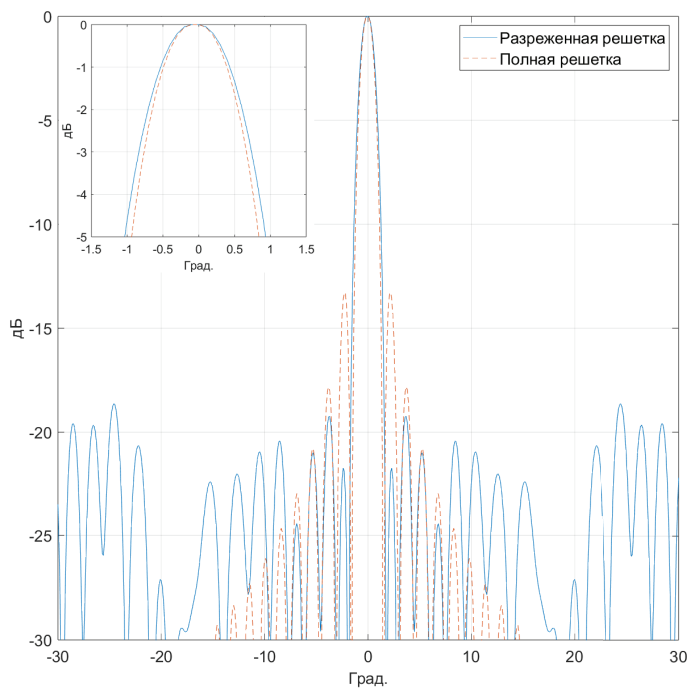
*a**б*

Рис. 4. Прореженная линейная антенная решетка, соответствующая элементам Tx : *a* — распределение элементов;

б — диаграмма направленности

Fig. 4. Thinned linear antenna array corresponding to Tx elements: *a* — distribution of elements; *b* — radiation pattern

делением элементов. Видно, что в плоскости угла места она соответствует диаграмме направленности полной конфигурации (рис. 2б). Это ожидаемо, так как линейка Tx -элементов полная, что приводит к формированию не прореженного распределения виртуальных элементов. Сечение в плоскости азимута диаграммы полностью совпадает с диаграммой направленности прореженной антенной решетки (рис. 3б). Максимальный боковой лепесток наблюдается в плоскости угла места. В плоскости азимута уровень боковых лепестков на 5 дБ ниже, чем в плоскости угла

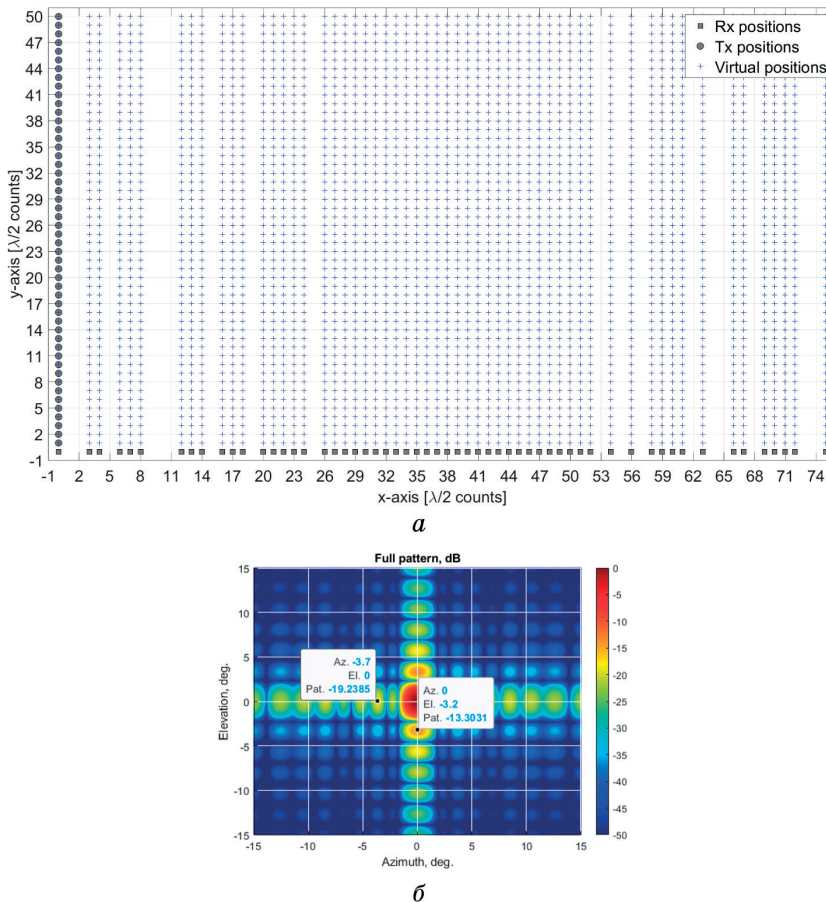


Рис. 5. MIMO антенная решетка, составленная из прореженного массива Rx -элементов и полного массива Tx -элементов ($Rx = 58$, $Tx = 50$): а — расположение элементов и виртуальная апертура; б — диаграмма направленности

Fig. 5. MIMO antenna array composed of a thinned array of Rx elements and a full array of Tx elements ($Rx = 58$, $Tx = 50$): a) element arrangement and virtual aperture; b) radiation pattern

места. Это обусловлено прореживанием линейки R_x -элементов, расположенной горизонтально. В других плоскостях боковые лепестки существенно (на 10–15 дБ) ниже и имеют нерегулярную структуру, обусловленную прореживанием антенной решетки по одной из координат.

Для случая использования прореженной T_x -решетки и полной R_x получаем аналогичный результат: в плоскости угла места формируется диаграмма направленности, характерная для прореженной антенной решетки, в плоскости азимута — диаграмма полной антенной решетки.

Это свидетельствует о разделимости пространственных переменных в диаграмме направленности МИМО антенной решетки. При рассматриваемом расположении R_x - и T_x -элементов, каждая из линеек элементов определяет форму и параметры диаграммы направленности МИМО антенной решетки в соответствующей плоскости.

Прореженные по двум координатам МИМО антенные решетки

Рассмотрим прореженную по двум координатам МИМО антенную решетку. В качестве линеек R_x - и T_x -элементов использованы полученные прореженные антенные решетки. Прореженная линейка R_x -элементов расположена в плоскости азимута, прореженная линейка T_x -элементов расположена в плоскости угла места. Используя в качестве линеек R_x - и T_x -элементов прореженные структуры, получили массив виртуальных излучателей, прореженный в плоскости азимута и угла места. Общее количество элементов такой решетки — 2320. Изображение прореженной виртуальной апертуры приведено на рис. 6. На рисунке квадратами показаны позиции R_x -элементов, кругами — позиции T_x -элементов, крестиками — позиции виртуальных элементов. Напомним, что в случае использования полных массивов R_x и T_x количество элементов виртуальной решетки составит 3800, то есть за счет прореживания удалось сократить количество виртуальных элементов (каналов обработки сигнала) в 1,6 раза.

На рис. 6 видно, что прореживание по двум осям приводит к нарушению регулярности боковых лепестков диаграммы направленности. Уровень боковых лепестков не превышает –18,3 дБ. Наиболее высокие боковые лепестки наблюдаются в плоскостях азимута и угла места. В других плоскостях уровень боковых лепестков на 13–15 дБ ниже, чем в рассмотренных. Ширина диаграммы направленности составила 2 градуса по углу места и 1,4 градуса — по азимуту.

В сравнении с полной ММО антенной решеткой можно отметить следующее. Количество Rx -элементов уменьшилось в 1,3 раза, Tx — в 1,25 раз, а виртуальных (каналов обработки приемника) элементов снизилось в 1,6 раза. Ширина главного лепестка диаграммы направленности сохранилась практически неизменной. Пиковый уровень боковых лепестков прореженной антенной решетки ниже на 5 дБ. Таким образом, прореживание двумерной ММО антенной решетки позволило не только снизить количество элементов Rx и Tx , формирующих ее, но и улучшить направленные свойства.

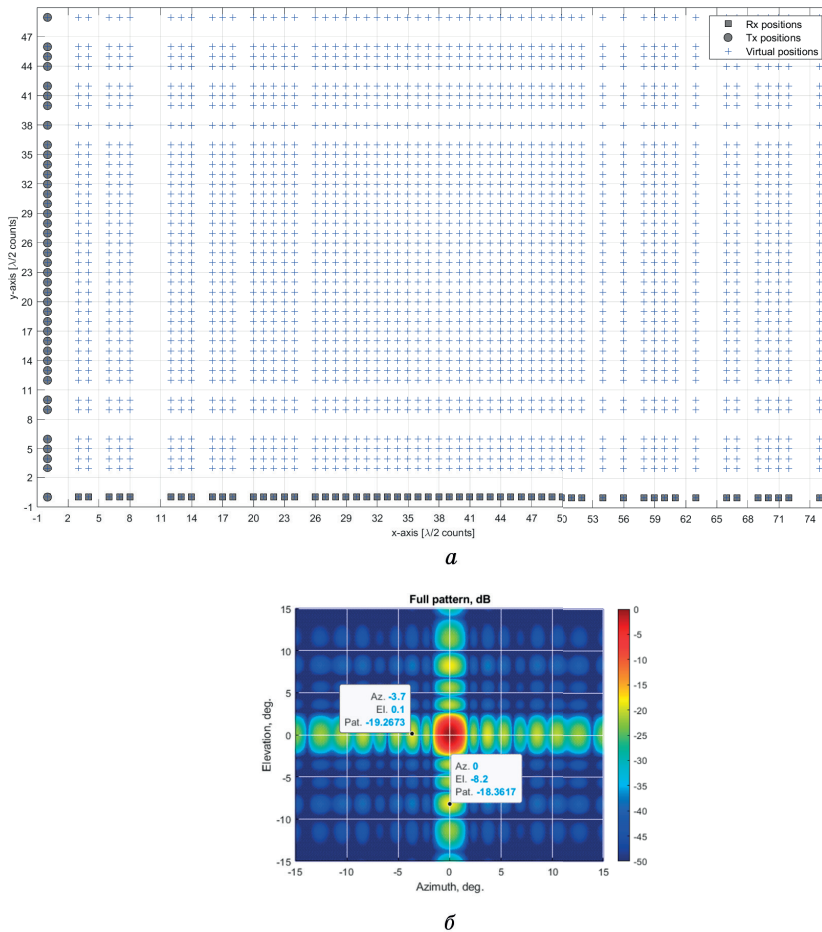


Рис. 6. ММО антенная решетка, составленная из прореженных массивов Rx - и Tx -элементов ($Rx = 58$, $Tx = 40$): *a* — расположение элементов и виртуальная апертура; *b* — диаграмма направленности

Fig. 6. MIMO antenna array composed of thinned arrays of Rx and Tx elements ($Rx = 58$, $Tx = 40$): *a*) element arrangement and virtual aperture; *b*) radiation pattern

Несложно увидеть, что во всех рассмотренных случаях полученная диаграмма направленности двумерной ММО антенной решетки является произведением диаграмм направленности одномерных решеток, местоположение элементов которых совпадает с координатами Rx - и Tx -элементов. То есть распределение Rx -элементов в горизонтальной плоскости определяет форму диаграммы направленности в плоскости азимута, а распределение Tx -элементов в вертикальной плоскости — форму диаграммы направленности в плоскости угла места. Это подтверждает разделимость пространственных переменных для виртуальной апертуры ММО антенной решетки, Rx - и Tx -элементы которой расположены на двух взаимно ортогональных линиях.

Это позволяет использовать результаты, полученные в [20], для определения пикового уровня боковых лепестков прореженной ММО антенной решетки при заданной величине коэффициента прореживания для каждой из линеек элементов. Для случая равномерного амплитудного распределения эта зависимость показана на рис. 7.

Линейки элементов Rx и Tx , образующих ММО антенную решетку, могут быть прорежены с разным коэффициентом прореживания. Пиковый уровень боковых лепестков для азимута и угла места при этом будут различны. В этом случае пиковый уровень боковых лепестков диаграммы направленности двумерной ММО антенной решетки будет определяться линейкой, имею-

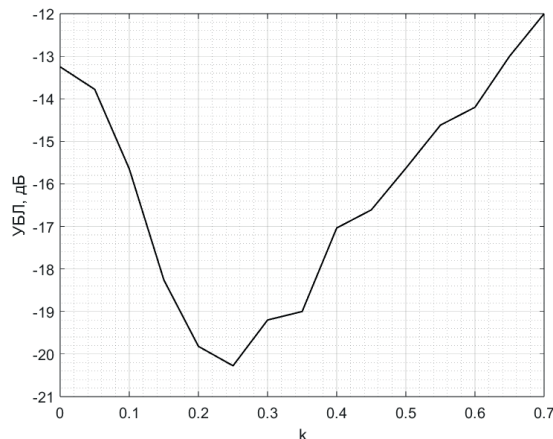


Рис. 7. Зависимость пикового уровня боковых лепестков для ММО антенной решетки, Rx - и Tx -элементы которой расположены на двух взаимно ортогональных линиях
Fig. 7. Peak side lobe level dependence for MIMO antenna array with Rx and Tx elements located on two mutually orthogon

щий большой уровень бокового лепестка. Это видно на рис. 5, где ММО антенная решетка образована полной линейкой элементов Tx (пиковый уровень боковых лепестков $-13,3$ дБ) и прореженной линейкой Rx (пиковый уровень боковых лепестков $-18,3$ дБ). Видно, что боковые лепестки этой антенной решетки выше в плоскости угла места. Они и определяют пиковый уровень боковых лепестков всей антенной решетки в целом. Именно в этой плоскости расположена полная линейка Tx -элементов.

Заключение

В работе показана возможность использования линейных прореженных антенных решеток, синтезированных генетическим алгоритмом, минимизирующим пиковый уровень боковых лепестков, для формирования прореженных двумерных ММО антенных решеток, приемные и передающие элементы которых расположены вдоль взаимно ортогональных линий. Для этого рассмотренным в [11] генетическим алгоритмом синтезируется прореженная классическая одномерная линейная антенная решетка. Местоположение излучателей активных этой прореженной решетки определяет расположение Rx - или Tx -элементов ММО антенной решетки.

Подтверждена делимость диаграммы направленности ММО антенной решетки, элементы Rx и Tx которой расположены на двух взаимно ортогональных линиях. Приведена зависимость пикового уровня боковых лепестков такой антенной решетки от коэффициента прореживания линеек элементов, формирующих ее. Показано, что прореживанием линеек Rx - и Tx -элементов ММО антенной решетки можно получить уровень боковых лепестков более низкий, чем в случае полной антенной решетки.

Приведена зависимость, позволяющая определить пиковый уровень боковых лепестков двумерной прореженной ММО антенной решетки при заданном коэффициенте прореживания.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Новосибирского государственного технического университета, НГТУ. Номер проекта С23-20.

Acknowledgements

The research was financially supported by Novosibirsk State Technical University, NSTU. Project number C23-20.

Список литературы

1. Bergin J., Guerci J. R. *MIMO Radar. Theory and application*. Boston-London: Artech House; 2018. 231 p.
2. Черняк В. С. *Многопозиционная радиолокация*. М.: Радио и связь; 1993. 416 с.
3. Li J., Stoica P. *MIMO radar signal processing*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.; 2009. 469 p.
4. Черняк В. С. О новых и старых идеях в радиолокации: MIMO РЛС. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2011;(2):5–20.
5. Плохов С. Н., Шабунин С. Н. Радиолокатор с повышенным угловым разрешением при широкоугольном сканировании. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(3):318–335.
6. Bliss D. W., Forsythe K. W. Multiple-input multiple-output (MIMO) Radar and imaging: degrees of freedom and resolution. *Proceedings of the 37th Asilomar Conference on Signal, Systems and Computers*. 09–12 November 2003. Pacific Grove, CA, USA. IEEE; 2003. Pp. 54–59.
7. Fortunati S., Sanguinetti L., Gini F., Greco M. S., Himed B. Massive MIMO Radar for Target Detection. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2020;68:859–871.
8. Grove R. L. *MIMO radar Systems and Algorithms — Imperfections and Calibration*. PhD Thesis. Technical University of Denmark; 2022. 213 p.
9. Kedar A. Deterministic synthesis approach for linear sparse array antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2020;68(9):6667–6674.
10. Buonanno G., Costanzo S., Solimene R. Statistically thinned array antennas for simultaneous multibeam application. *IEEE Access*. 2022;10:60230–60240.
11. Karasev A. S., Stepanov M. A. Genetic Algorithm for Antenna Array Thinning with Minimization of Side Lobe Level. *2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*. 19–21 November 2021. Novosibirsk, Russia. IEEE; 2021. Pp. 268–272.
12. Степанов М. А., Карасев А. С. Синтез разреженной линейной антенной решетки с сохранением ширины главного лепестка и минимальным пиковым уровнем боковых лепестков при помощи генетического алгоритма. *Журнал радиоэлектроники*. 2022;(5):1–20.
13. Haupt R. L. Thinned arrays using genetic algorithms. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1994;42(7):993–999.
14. Jijenth M., Suman K. K., Gangwar V. S., Singh A. K., Singh S. P. A novel technique based on modified genetic algorithm for the synthesis of thinned planar antenna array with low peak side lobe level over desired scan volume. *2017 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC)*. 11–13 December 2017. Ahmedabad, India. IEEE; 2017. Pp. 251–254.

15. Liu D., Feng Q.-Y., Wang W.-B. Discrete Optimization Problems of Linear Array Synthesis by Using Real Number Particle Swarm Optimization. *Progress In Electromagnetics Research*. 2013;133:407–424.

16. Basu B., Mahanti G. K. Artificial Bees Colony Optimization for Synthesis of Thinned Mutually Coupled Linear Array Using Inverse Fast Fourier Transform. *2011 International Conference on Devices and Communications (ICDeCom)*. 24–25 February 2011. Mesra, India. IEEE; 2011. Pp. 1–5.

17. Quevedo-Teruel O., Rajo-Iglesias E. Ant Colony Optimization in Thinned Array Synthesis With Minimum Sidelobe Level. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2006;5:349–352.

18. Ghosh P., Das S. Synthesis of Thinned Planar Concentric Circular Antenna Arrays — a Differential Evolutionary Approach. *Progress In Electromagnetics Research B*. 2011;29:63–82.

19. Пастернак Ю. Г., Пендюрин В. А., Проскурин Д. К., Фёдоров С. М. Формирование прореженной фазированной антенной решетки с помощью метода точечных источников. *Радиотехника*. 2023;87(8):5–10.

20. Karasev A. S., Stepanov M. A. Effect of Linear Antenna Array Thinning on Its Directional Pattern Parameters. *2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*. 30 June 2022–04 July 2022. Altai, Russian Federation. IEEE; 2022. Pp. 97–100.

21. Бахрах Л. Д., Бенинсон Л. С., Зелкин Е. Г. Справочник по антенной технике: в 5 т. М.: Издат. предприятие ред. журн. «Радиотехника» (ИПРЖР); 1997. Т. 1. 256 с.

References

1. Bergin J., Guerci J. R. *MIMO Radar. Theory and application*. Boston–London: Artech House; 2018. 231 p.

2. Chernyak V. S. *Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya [Multi-position radar]*. Moscow: Radio i svyaz'; 1993. 416 p. (in Russ.)

3. Li J., Stoica P. *MIMO radar signal processing*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.; 2009. 469 p.

4. Chernyak V. S. About new and old ideas in radar: MIMO Radars. *Achievements of Modern Radioelectronics*. 2011;(2):5–20. (in Russ.)

5. Plovov, S. N., Shabunin, S. N. Radar with the increased angular resolution in wide-angle scanning. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(3):318–335. (in Russ.)

6. Bliss D. W., Forsythe K. W. Multiple-input multiple-output (MIMO) Radar and imaging: degrees of freedom and resolution. *Proceedings of the 37th Asilomar Conference on Signal, Systems and Computers*. 09–12 November 2003. Pacific Grove, CA, USA. IEEE; 2003. Pp. 54–59.

7. Fortunati S., Sanguinetti L., Gini F., Greco M. S., Himed B. Massive MIMO Radar for Target Detection. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2020;68:859–871.
8. Grove R. L. *MIMO radar Systems and Algorithms — Imperfections and Calibration*. PhD Thesis. Technical University of Denmark; 2022. 213 p.
9. Kedar A. Deterministic synthesis approach for linear sparse array antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2020;68(9):6667–6674.
10. Buonanno G., Costanzo S., Solimene R. Statistically thinned array antennas for simultaneous multibeam application. *IEEE Access*. 2022;10:60230–60240.
11. Karasev A. S., Stepanov M. A. Genetic Algorithm for Antenna Array Thinning with Minimization of Side Lobe Level. *2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*. 19–21 November 2021. Novosibirsk, Russia. IEEE; 2021. Pp. 268–272.
12. Stepanov M. A., Karasev A. S. Thinned linear antenna array synthesis using genetic algorithm while maintaining the initial half-power beamwidth and low peak sidelobe level. *Zhurnal radioelektroniki [Journal of Radio Electronics]*. 2022;(5):1–20 (in Russ.)
13. Haupt R. L. Thinned arrays using genetic algorithms. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1994;42(7):993–999.
14. Jijenth M., Suman K. K., Gangwar V. S., Singh A. K., Singh S. P. A novel technique based on modified genetic algorithm for the synthesis of thinned planar antenna array with low peak side lobe level over desired scan volume. *2017 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC)*. 11–13 December 2017. Ahmedabad, India. IEEE; 2017. Pp. 251–254.
15. Liu D., Feng Q.-Y., Wang W.-B. Discrete Optimization Problems of Linear Array Synthesis by Using Real Number Particle Swarm Optimization. *Progress In Electromagnetics Research*. 2013;133:407–424.
16. Basu B., Mahanti G. K. Artificial Bees Colony Optimization for Synthesis of Thinned Mutually Coupled Linear Array Using Inverse Fast Fourier Transform. *2011 International Conference on Devices and Communications (ICDeCom)*. 24–25 February 2011. Mesra, India. IEEE; 2011. Pp. 1–5.
17. Quevedo-Teruel O., Rajo-Iglesias E. Ant Colony Optimization in Thinned Array Synthesis With Minimum Sidelobe Level. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2006;5:349–352.
18. Ghosh P., Das S. Synthesis of Thinned Planar Concentric Circular Antenna Arrays — a Differential Evolutionary Approach. *Progress In Electromagnetics Research B*. 2011;29:63–82.

19. Pasternak Yu.G., Pendyurin V. A., Proskurin D. K., Fedorov S. M. Formation of a threened phased antenna array using the point source method. *Radiotekhnika*. 2023;87(8):5–10. (In Russ.)

20. Karasev A. S., Stepanov M. A. Effect of Linear Antenna Array Thinning on Its Directional Pattern Parameters. *2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*. 30 June 2022–04 July 2022. Altai, Russian Federation. IEEE; 2022. Pp. 97–100.

21. Bakhrahk L. D., Beninson L. S., Zelkin E. G. *Spravochnik po antennoi tekhnike: [Reference book on antenna technique]: in 5 vol.* Moscow: IPRZhR; 1997. Vol. 1. 256 p. (in Russ.)

Информация об авторах

Соколов Вадим Сергеевич, аспирант кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия.

Степанов Максим Андреевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия.

Артышенко Вадим Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия.

Подкопаев Артемий Олегович, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия.

Information about the authors

Vadim S. Sokolov, Postgraduate Student, Department of Radio Receiving and Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Maxim A. Stepanov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Radio Receiving and Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Vadim V. Artyushenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Radio Receiving and Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Artemy O. Podkopaev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Radio Receiving and Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Поступила / Received: 06.10.2023

Принята в печать / Accepted: 01.11.2023