

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.1.15>

УДК: 621.396.96, 621.396.67

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ПИКОВОГО БОКОВОГО ЛЕПЕСТКА МНОЖИТЕЛЯ НАПРАВЛЕННОСТИ РЕГУЛЯРНОЙ ММО АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ СМЕЩЕНИЕМ ПОЛОЖЕНИЯ ЕЕ РЕАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

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

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

Статья поступила в редакцию 30 октября 2025 г.

Аннотация. В работе предложен и обоснован метод уменьшения пикового уровня бокового лепестка регулярных ММО антенных решеток. Метод основан на отклонении положения реальных передающих и приемных элементов решетки на случайную величину вдоль двух ортогональных декартовых координат на плоскости. Это позволяет разрушать дифракционные максимумы в множителе решетки, которые и определяют уровень пикового бокового лепестка. Показано, что даже небольшие отклонения с равновероятным распределением в диапазоне одной рабочей длины волны позволяют уменьшить уровень пикового бокового лепестка более, чем на 3 дБ. При этом практически не изменяется как ширина главного луча множителя решетки, так и средний уровень боковых лепестков. Отмечено, что при увеличении диапазона отклонения координат больше, чем на две рабочие длины волны, в конфигурации решетки преобладает случайный компонент. Это ограничивает достижимую величину снижения уровня пикового бокового лепестка.

Ключевые слова: антенная решетка, ММО РЛС, диаграмма направленности, множитель решетки, уровень боковых лепестков, математическое моделирование.

Автор для переписки: Подкопаев Артемий Олегович, podkopaev@corp.nstu.ru

Введение

Среди многообразия видов антенных систем можно выделить ММО антенные решетки. Они состоят из разнесенных в пространстве приемных и передающих элементов таким образом, что каждый элемент может быть только приемником или только передатчиком. Передающие элементы излучают взаимно некоррелированные сигналы, а приемные – осуществляют прием совокупности сигналов, выделяемых из электромагнитных полей на их апертуре. Такая обработка сигналов имеет название multiple input – multiple output или ММО, а антенная система называется ММО антенной решеткой [1-7].

Известные координаты приемных и передающих элементов, а также взаимная ортогональность сигналов передатчиков позволяет сформировать на приемной стороне ММО антенной решетки виртуальную апертуру [1-9], состоящую из виртуальных элементов, координаты которых определяются как:

$$\begin{aligned} X_{v_{k,p}} &= X_{r_k} + X_{t_p}; \\ Y_{v_{k,p}} &= Y_{r_k} + Y_{t_p}; \\ Z_{v_{k,p}} &= Z_{r_k} + Z_{t_p}, \end{aligned} \quad (1)$$

где для приемного элемента под номером k , с декартовыми координатами $(X_{r_k}, Y_{r_k}, Z_{r_k})$, и передающего элемента под номером p , с координатами $(X_{t_p}, Y_{t_p}, Z_{t_p})$, виртуальный элемент имеет координаты $(X_{v_{k,p}}, Y_{v_{k,p}}, Z_{v_{k,p}})$.

К ключевым параметрам ММО антенной решетки относятся: количество реальных приемных и передающих элементов, ширина главного луча диаграммы направленности (ДН) и пиковый уровень бокового лепестка (ПУБЛ), характеризующие ее направленные или пространственно-селективные свойства. Направленные свойства определяются конфигурацией виртуальных элементов ММО антенной решетки [1-11].

Из выражения (1) можно заключить следующее.

— Во-первых, виртуальная апертура состоит из большего числа элементов, чем приемная и передающая решетки вместе при условии, что каждая из них содержит более 1 элемента. Для антенной системы из N_r приемников и N_t передатчиков количество виртуальных элементов равно $N_v = N_r \cdot N_t$.

— Во-вторых, размеры виртуальной апертуры больше размеров приемной и передающей решеток. Значит, диаграмма направленности ММО антенной решетки в виде виртуальной апертуры на приемной стороне имеет более узкий главный луч, чем ДН только приемной антенной решетки.

Таким образом, ММО антенная решетка предоставляет возможности по обеспечению требуемых направленных свойств антенной системы при меньшем количестве элементов, чем потребовалось бы для классических устройств [1-9]. Кроме того, самый успешный на сегодняшний день способ реализации ММО антенны на основе цифровой антенной решетки [1-9], позволяет применять к N_v цифровым каналам различные методы для снижения уровня бокового лепестка, регулировки ширины главного луча, формирования провалов в ДН.

Сказанное выше определило широкий интерес к исследованию, разработке и внедрению компактных ММО антенных решеток, состоящих из малого количества реальных элементов (как правило, не более сотни), в антенные системы радиотехнических устройств малой дальности. К ним можно отнести радиолокационные станции (РЛС) беспилотных и управляемых наземных, надводных и воздушных аппаратов, базовые станции систем беспроводной и спутниковой связи, устройства спутниковой и локальной радионавигации, интернета вещей [1-9, 12-14].

Подавляющее большинство известных ММО антенных решеток имеют регулярную конфигурацию: группы элементов, расположенные в пространстве с постоянным шагом. Группы могут представлять собой одномерные линейки, двумерные массивы, фракталы и др. Примеры регулярных ММО антенных решеток, внешний вид которых можно найти в открытом доступе в сети интернет, приведены на рис. 1 [15]. Распространенность таких конфигураций

вызвана предсказуемыми для них значениями ширины луча ДН, а также простотой реализации системы распределения СВЧ-энергии по элементам антенной решетки [8-14].

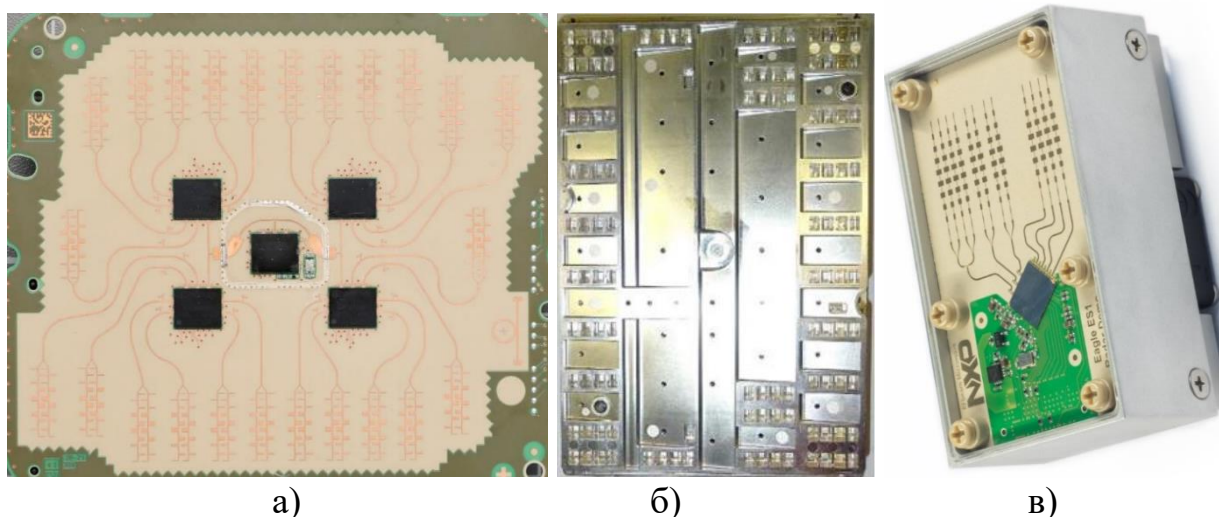


Рис. 1. Регулярные MIMO антенные решетки:

- а) модель NF3-FR5CUEC фирмы Bosch; б) ARS540 фирмы Continental;
- в) MR3003_RD фирмы RFbeam Microwave GmbH с совмещенным модулем цифровой обработки сигналов.

Большое расстояние между элементами MIMO антенной решетки, обусловлено двумя факторами: малым количеством элементов, обеспечивающим относительную простоту и дешевизну реализации устройства; запросом на обеспечение виртуальной апертуры как можно больших размеров и, соответственно, узкого главного луча диаграммы направленности при компактных реальных размерах антенной системы [1-14]. Таким образом, малое количество элементов с низкой плотностью размещается на большой площади.

Известно, что если расстояние между элементами превышает половину рабочей длины волны, то в угловой полусфере множителя направленности или просто множителя антенной решетки наблюдаются дифракционные лепестки – побочные максимумы, соизмеримые с уровнем главного луча. Наличие дифракционных максимумов является крайне нежелательным, так как это существенно ухудшает пространственно-селективные свойства антенной решетки [10-11].

Рассмотрим конфигурацию решетки, схожую с представленной на рис. 1а. Расположение элементов на декартовой плоскости XOY приведено на рис. 2. Передающие элементы обозначены красными маркерами-квадратами, приемные – синими маркерами-кругами, виртуальные – черными маркерами-крестами. Координаты элементов выражены в долях длины волны.

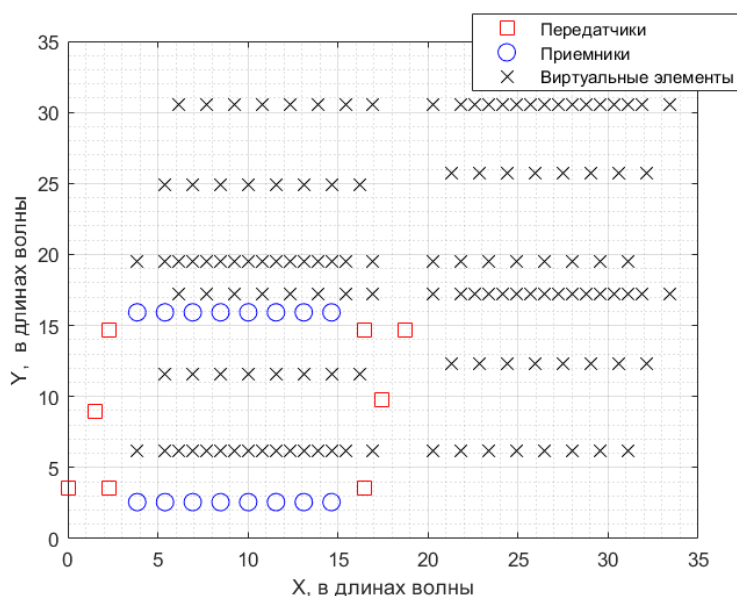


Рис. 2. Конфигурация ММО антенной решетки.

Очевидно, что расстояния между как приемными и передающими элементами, так и виртуальными существенно превышают половину длины волны. Это означает наличие большого количества дифракционных максимумов. Нормированный множитель направленности этой антенной решетки приведен на рис. 3 для угловых координат: азимут и угол места [12]. Уровень пикового бокового лепестка показан на рис. 3 и составляет -1.18 дБ.

Сильно выраженные дифракционные лепестки, наблюдаемые на рис. 3 в окрестности азимутальных углов 0° и $\pm 40^\circ$, приводят к ряду проблем. Во-первых, высокий дифракционный максимум неотличим от бокового лепестка. Высокий ПУБЛ означает низкую помехозащищенность устройства с такой антенной системой, плохие пространственно-селективные свойства. Во-вторых, при ПУБЛ, соизмеримом по уровню с главным лучом диаграммы направленности (ДН), возникает неоднозначность в определении направления на источник излучения [10-11].

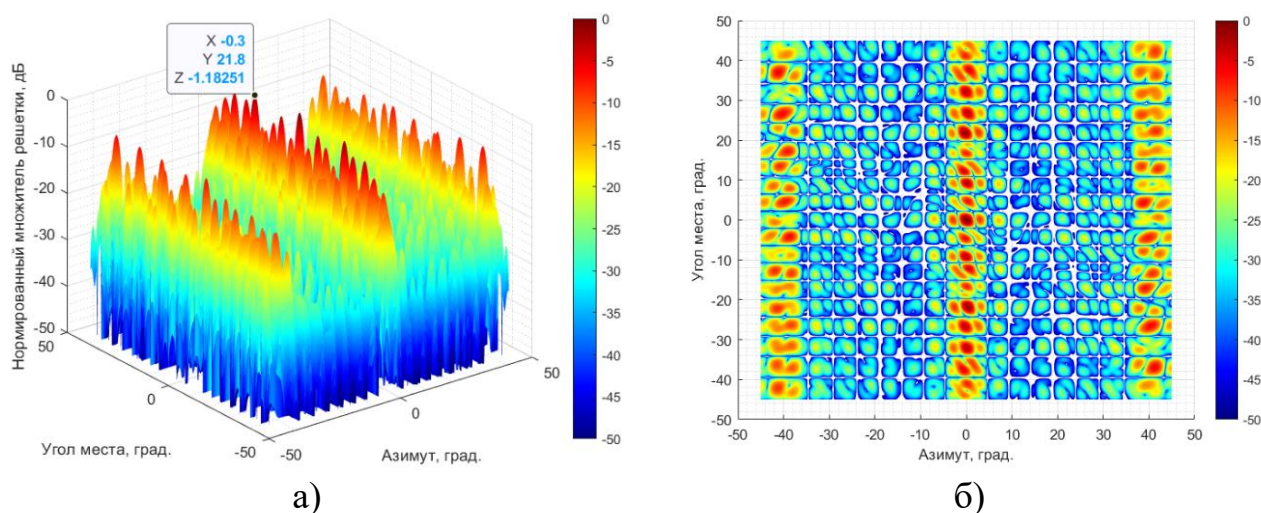


Рис. 3. Множитель направленности ММО антенной решетки.

Таким образом, актуальной является задача уменьшения уровня дифракционных лепестков регулярных ММО антенных решеток с целью улучшения их направленных свойств.

1. Понижение уровня боковых лепестков

Естественным способом борьбы с дифракционными максимумами является увеличение плотности расположения элементов. Большее количество элементов размещается на площади тех же линейных размеров, что позволяет сохранить требуемую ширину главного луча ДН [10-11]. Это приводит к уменьшению межэлементного расстояния и к уменьшению количества дифракционных лепестков, наблюдаемых в том же секторе углов. Критическим недостатком такого подхода является увеличение конструктивной сложности и стоимости устройства из-за увеличения количества реальных элементов и необходимых для них приемных и передающих трактов.

Из литературы известен ряд способов борьбы с дифракционными максимумами множителя решетки [16-21]. Их можно укрупненно разделить на три группы.

К первой относятся компенсационные методы, при которых в направлениях дифракционных максимумов формируются нули диаграмм направленности излучателей или множителей подрешеток в составе антенной решетки [16-18]. Такие способы позволяют подавить дифракционные максимумы, однако, требуют

точной реализации, во-первых, антенн элементов решетки с необходимыми формами диаграмм направленности, во-вторых, организации и синхронизации работы подрешеток. Эти требования не являются критическими для ММО антенных систем телекоммуникационного оборудования, но при этом становятся очень затруднительными к исполнению в компактных антенных решетках ММО РЛС для наземных, воздушных или спутниковых объектов [4-7].

Ко второй группе относятся методы цифровой обработки сигналов, позволяющие на приемной стороне формировать дополнительные виртуальные элементы в составе антенной решетки, интерполировать как амплитудно-фазовые распределения по элементам решетки, так и амплитуды и фазы падающих волн по ее апертуре [18-20]. Количество сформированных виртуальных элементов и количество подавляемых дифракционных максимумов ограничено количеством реальных элементов в составе антенной решетки [18-20]. Для ММО антенных решеток, как видно по рис. 1-3, количество дифракционных максимумов может заметно превышать количество реальных приемных и передающих элементов, что делает подходы этой группы неэффективными. Кроме того, такие методы потребуют увеличения требований к скорости вычислений, которые для ММО систем и без того высокие [4-7].

К третьей группе относятся методы, обеспечивающие подавление дифракционных максимумов за счет изменения в конфигурации антенной решетки – изменения взаимного расположения ее элементов [18,21]. Суть этих методов заключается в определении такой конфигурации, при которой дифракционный максимум ослаблен или соизмерим с уровнем бокового лепестка. Полностью случайные конфигурации элементов является наиболее эффективным, т.к. при нем в конфигурации решетки отсутствует регулярность, необходимая для формирования дифракционных максимумов [5,10-11,18]. Это позволяет бороться с дифракционными максимумами даже при антенных системах с очень низкой плотностью размещения элементов, к каким относятся ММО решетки.

Методы на основе изменения конфигурации элементов решетки с целью подавления дифракционных максимумов и, следовательно, уменьшения ПУБЛ являются наиболее подходящими. Они не требуют изменения размеров апертуры и количества реальных элементов, повышения вычислительной нагрузки на модули цифровой обработки сигналов, высокой точности изготовления излучателей со специфическими диаграммами направленности.

В [13] показаны ММО антенные решетки, состоящие из малого количества элементов, имеющих случайную конфигурацию. Таким решеткам соответствует множитель решетки с ПУБЛ существенно более низким, чем на рис. 3. На этом основании предполагается, что случайные, даже малые отклонения координат элементов регулярной конфигурации, соизмеримые с половиной длиной волны, приведут к существенному уменьшению ПУБЛ. Такой подход позволит формировать как новые конфигурации ММО антенных решеток из малого количества реальных элементов с пониженным ПУБЛ, так и улучшать уже имеющиеся, например, представленные на рис. 1-2, распространенные коммерческие образцы.

Это определяет **цель работы**: обосновать и исследовать способ уменьшения уровня пикового бокового лепестка диаграммы направленности ММО антенной решетки с регулярным расположением элементов, заключающийся в случайном изменении координат ее элементов.

2. Случайное изменение координат элементов

Рассмотрим для примера плоскую решетку, представленную на рис. 2, состоящую из идеальных точечных всенаправленных реальных элементов. Ее двумерная конфигурация характеризуется линейным регулярным расположением приемников и регулярным, расположением передатчиков. Расстояние между группами приемников и передатчиков превышает 10 длин волн. Это приводит к большому расстоянию между элементами виртуальной апертуры: 5-10 длин волн по оси Y и до 2 длин волн по оси X .

Межэлементное расстояние превышает полуволновое вдоль обеих осей координат. Большее расстояние между элементами по вертикали соответствует большему количеству дифракционных максимумов вдоль оси угла места [10-11] на рис. 3.

Сформируем в конфигурации антенной решетки случайный компонент. Внесем изменения в координаты каждого из приемных и передающих элементов в виде набора случайных независимых добавок, имеющих равновероятное распределение в диапазоне значений $[-\sigma_x, \sigma_x]$ и $[-\sigma_y, \sigma_y]$ вдоль осей X и Y соответственно [22]. Тогда выражение (1), при условии расположения элементов в плоскости XOY , принимает вид:

$$\begin{aligned} Xv_{k,p} &= Xr_k + \delta rx_k + Xt_p + \delta tx_p; \\ Yv_{k,p} &= Yr_k + \delta ry_k + Yt_p + \delta ty_p, \end{aligned} \quad (2)$$

где δrx_k и δtx_p – случайные добавки к координатам приемника под номером k и передатчика под номером p вдоль оси X , а δry_k и δty_p – добавки к координатам вдоль оси Y .

Элементы решетки имеют ненулевые физические размеры. При отклонении их расположения могут возникнуть наложения одних элементов на другие. Кроме того, близкое расположение элементов означает их взаимное влияние друг на друга, что может привести к нарушению условий согласования и изменению формы ДН [10,14]. Требования к конструктивной реализуемости антенной решетки и к ослаблению взаимного влияния элементов в ее составе друг на друга определяют ограничения на изменение координат по выражению (2). Каждый реальный элемент должен отстоять от любого соседнего не менее, чем на размеры защитного интервала вдоль соответствующей оси координат. Простейший защитный интервал имеет форму квадрата со стороной в половину длины волны. Если антенны элементов решетки имеют размеры больше, чем половина длины волны, то защитный интервал должен быть соответствующим образом

увеличен [10,14]. На рис. 4 приведена иллюстрация к защитному интервалу для точечных элементов решетки.

На рисунке 4 кругами показаны точечные излучатели. Защитный интервал выделен прерывистой линией и имеет форму квадрата со стороной $\lambda/2$, где λ – рабочая длина волны антенны. Защитные интервалы для элементов 1 и 2 пересекаются, для остальных – нет.

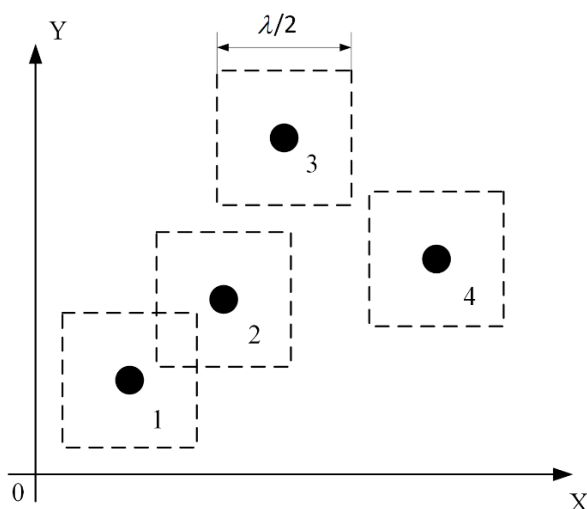


Рис. 4. Защитный интервал при расположении элементов решетки.

Внесем изменения в координаты исходной решетки по выражению (2) так, чтобы удовлетворять требованиям защитного интервала в виде квадрата со стороной $\lambda/2$.

Пример новых конфигураций, полученных из исходной решетки на рис. 2 при $\sigma_x = \sigma_y = \lambda/2$ и $\sigma_x = \sigma_y = \lambda$, приведены на рис. 5. На рис. 5б, соответствующем λ , заметна большая случайность в расположении реальных и, следовательно, виртуальных элементов по сравнению с рис. 5а, соответствующим $\lambda/2$.

Идеальность и всенаправленность точечных элементов означает эквивалентность диаграммы направленности и множителя антенной решетки [10-12].

На рис. 6 приведен множитель решетки для конфигурации рис. 5а. ПУБЛ для такой конфигурации уменьшился более, чем на 2 дБ по сравнению с исходной решеткой на рис. 2, 3.

На рис. 7 приведен множитель решетки для конфигурации рис. 5б. ПУБЛ для такой конфигурации уменьшился более, чем на 4 дБ по сравнению с исходной решеткой на рис. 2, 3.

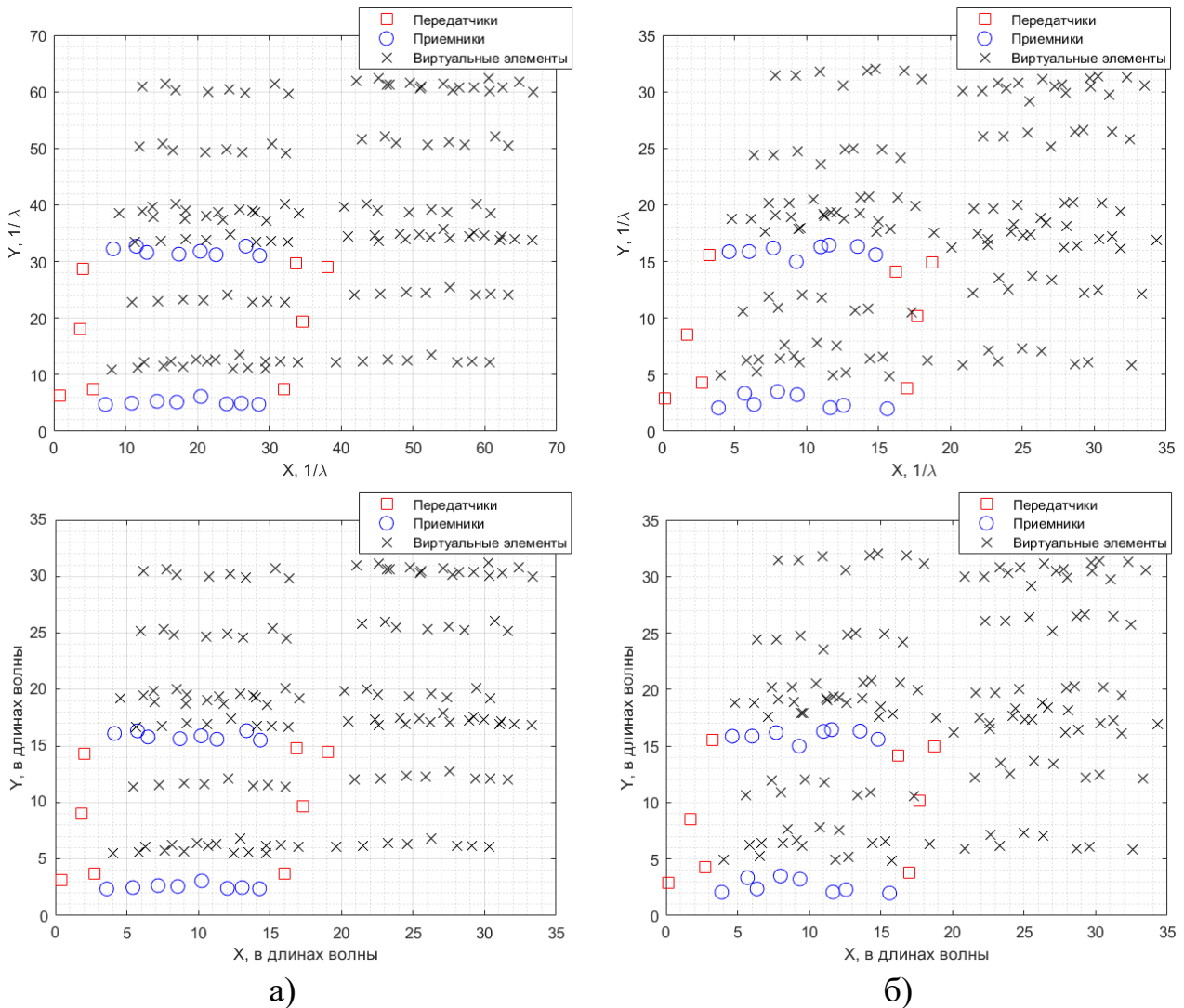


Рис. 5. Конфигурации ММО антенных решеток со случайным отклонением координат реальных элементов.

Из рисунков 5-7 следует, что при отклонении координат реальных элементов вдоль обеих осей координат даже на малые значения, соизмеримые с половиной или целой длиной волны существенно уменьшается ПУБЛ. Случайный компонент их конфигурации разрушает дифракционные лепестки [10-11, 23-24]. Ширина главного луча сохраняется, т.к. изменения линейных размеров апертуры при таких диапазонах отклонений является малой.

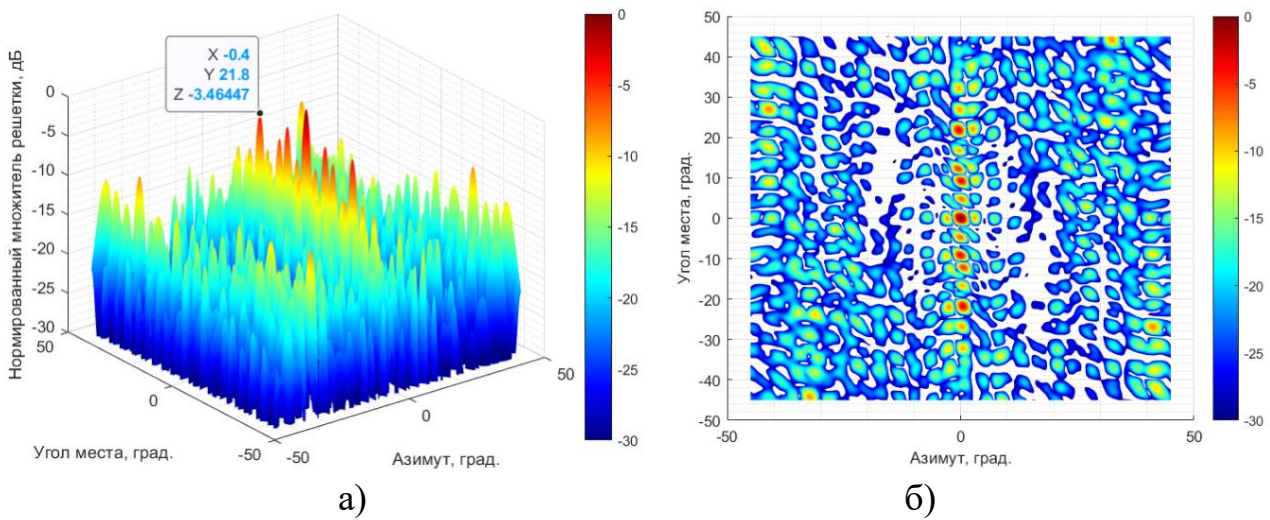


Рис. 6. Множитель решетки для конфигурации со случайным отклонением координат элементов при $\sigma_x = \sigma_y = \lambda / 2$.

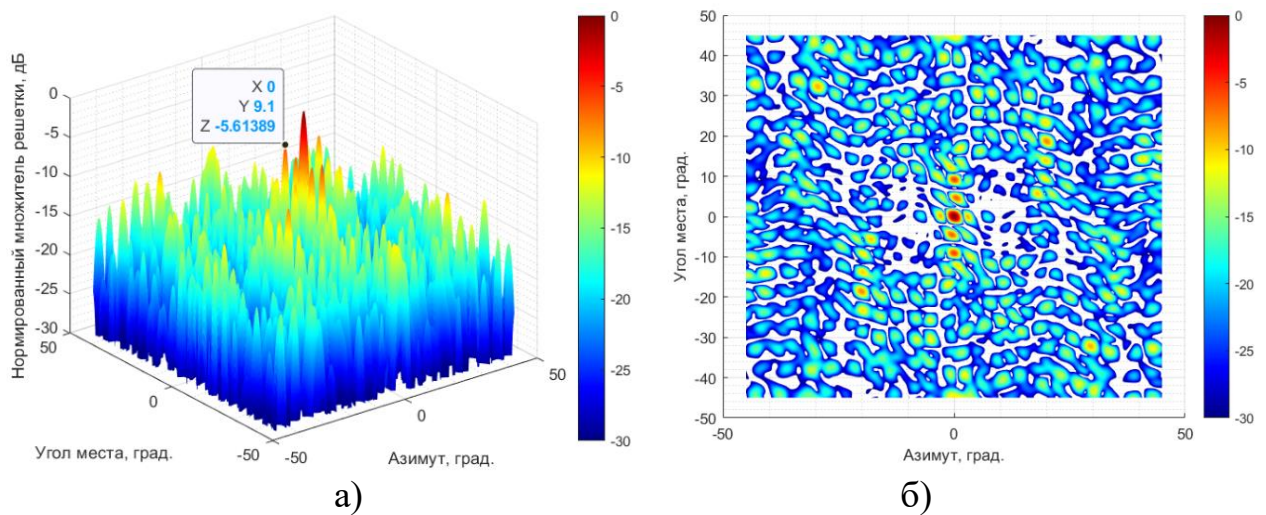


Рис. 7. Множитель решетки для конфигурации со случайным отклонением координат элементов при $\sigma_x = \sigma_y = \lambda$.

Таким образом, предложенный способ позволяет заметно снизить уровень пикового бокового лепестка множителя регулярной антенной решетки путем малого случайного изменения координат ее реальных элементов при сохранении ширины главного луча. Для решеток с такой низкой плотностью размещения приемников и передатчиков, как на рис. 1 отклонения их координат на величину λ не приведут к необходимости существенно изменять структуру распределителя мощности, взаимного расположения блоков излучателей и цифровой обработки сигналов, общие габариты и корпус. Это означает большой практический потенциал предложенного способа.

3. Плотность распределения вероятности ПУБЛ

Изменение координат элементов является случайным, значит, конфигурация и уровень боковых лепестков множителя решетки тоже являются случайными. Необходимо охарактеризовать разброс значений ПУБЛ, оценить его минимальное достижимое значение, а также установить их зависимость от различных $\sigma_x = \sigma_y$ [14, 23-24]. Для этого с помощью математического моделирования оценим плотность распределения вероятностей (ПРВ) ПУБЛ для $\sigma_x = \sigma_y = \Delta$, где $\Delta = 0.25\lambda, 0.5\lambda, 0.75\lambda, 1\lambda, 1.5\lambda, 2\lambda, 3\lambda, 4\lambda$.

Проведем моделирование по следующему алгоритму.

- а) Зададим исходную конфигурацию ММО антенной решетки в виде набора приемных и передающих элементов на плоскости с декартовыми координатами X и Y . В работе в качестве исходной принята решетка, представленная на рис. 2.
- б) Установим диапазон отклонений координат элементов $[-\sigma_x, \sigma_x]$, $[-\sigma_y, \sigma_y]$ вдоль декартовых осей X и Y соответственно.
- в) Рассчитаем отклонения для каждого приемника и передатчика из условий равновероятного распределения с параметрами $[-\sigma_x, \sigma_x]$, $[-\sigma_y, \sigma_y]$ при условии $\sigma_x = \sigma_y = \Delta$, где $\Delta = 0.25\lambda, 0.5\lambda, 0.75\lambda, 1\lambda, 1.5\lambda, 2\lambda, 3\lambda, 4\lambda$. Внесем эти отклонения в координаты элементов.
- г) Проверим рассчитанные значения координат на соблюдение защитного интервала. Для моделирования выбран интервал в форме квадрата со стороной $\lambda / 2$. Если все элементы удовлетворяют защитному интервалу, то переходим к пункту д). Если хотя бы один элемент не удовлетворяет защитному интервалу, то возвращаемся к пункту в).
- д) По новой конфигурации рассчитаем множитель решетки и определим ПУБЛ.
- е) Накопим реализацию результатов оценки ПУБЛ. В работе объем реализации принят равным 30000.
- ж) Оценим ПРВ ПУБЛ по накопленной реализации.

Напомним, что величина ПУБЛ для исходной решетки с регулярным расположением элементов составляет -1.18 дБ, а ширина главного луча по уровню -3 дБ по азимуту и углу места соответственно составляет $[1.70; 1.80]^\circ$.

ПРВ для $\Delta = 0.25\lambda, 0.5\lambda, 0.75\lambda, 1\lambda, 1.5\lambda, 2\lambda, 3\lambda, 4\lambda$ при 100 интервалах разбиения приведены на рис. 8.

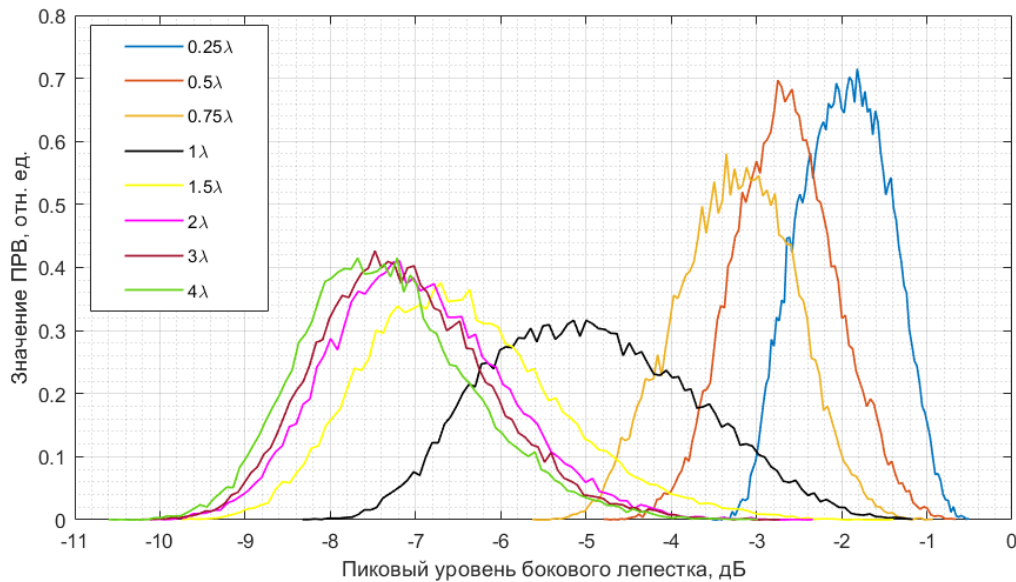


Рис. 8. ПРВ ПУБЛ при различных диапазонах отклонений координат элементов.

Опишем результаты, представленные на рис. 8.

Увеличение диапазона случайных отклонений координат элементов приводит к большему нарушению регулярной конфигурации виртуальной апертуры [22-24]. Среднее межэлементное расстояние уменьшается, следовательно, разрушаются дифракционные максимумы и уменьшается ПУБЛ [10-11, 22-24].

При отклонениях $\Delta \approx \lambda$ в конфигурации элементов наблюдается как случайный, так и регулярный компонент. При преобладании регулярного компонента $\Delta < \lambda$ дифракционные лепестки преимущественно сосредоточены вдоль угла места и имеют наибольшие уровни, согласно рис. 3, в сечениях азимутов, равных $-40, 0$ и 40 градусов. Уменьшение уровня пикового бокового лепестка происходит из-за «разрушения» дифракционных лепестков, при этом сами лепестки сохраняют свои угловые координаты. Значениям $\Delta > \lambda$ соответствует преобладание в конфигурации решетки случайного компонента.

Дифракционные максимумы соизмеримы с уровнем обычного бокового лепестка. Боковой лепесток пикового уровня имеет случайные координаты, а ПУБЛ зависит от средней плотности элементов решетки, но не от формы самой конфигурации. Наименьший достижимый таким способом ПУБЛ будет соответствовать полностью случайной виртуальной апертуре, достижимой уже при диапазонах отклонений $\Delta \geq 2\lambda$. Дальнейшее увеличение Δ не приводит к существенным изменениям в ПРВ ПУБЛ. Улучшение ПУБЛ случайной решетки может быть достигнуто увеличением количества элементов в ее составе.

Средний уровень ПУБЛ определяется математическим ожиданием или средним арифметическим значением по выборке ПУБЛ для каждого из рассматриваемых значений Δ . Он имеет смысл типового наиболее часто встречающегося значения ПУБЛ для при заданных границах диапазона изменения координат.

Наименьший достижимый ПУБЛ определен по реализациям ПУБЛ для каждого конкретного значения Δ . Он имеет смысл минимального достижимого пикового уровня бокового лепестка при заданных границах диапазона изменения координат и характеризуется левым хвостом ПРВ на рисунке 8. Значения ПРВ ограничены вероятностью 0.001.

Графики зависимости среднего и минимального достигнутого значения ПУБЛ приведены на рис. 9а, а графики зависимостей средней ширины главного луча по уровню -3 дБ – на рис. 9б.

Небольшое уменьшение ширины главного луча с ростом Δ объясняется увеличением геометрических размеров апертуры решетки из-за случайного изменения координат элементов относительно исходных значений. Чем больше Δ , тем большие значения могут принимать случайные отклонения, тем больших размеров может быть апертура. В среднем, изменение ширины главного луча в обоих угловых сечениях при $\Delta = 4\lambda$ не превышает 0.1° , т.е. 6 %. Такое отклонение является малым, поэтому можно считать, что ширина главного луча сохраняется.

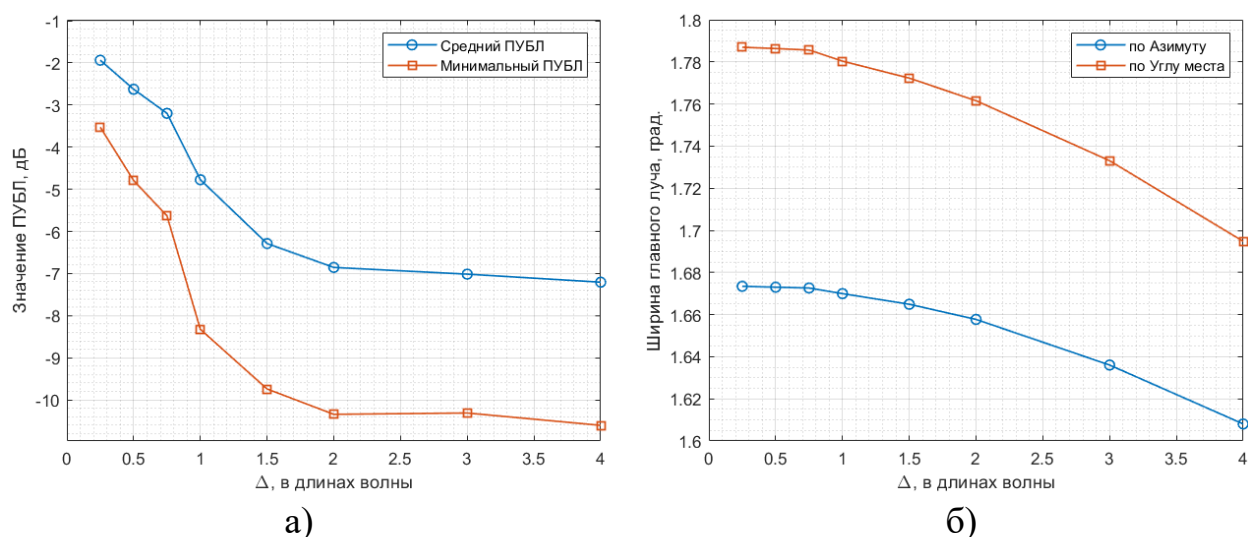


Рис. 9. Зависимости от ширины диапазона отклонения координат:
 а) среднего и минимального значений ПУБЛ;
 б) средней ширины главного луча в азимутальном и угломестном сечениях.

Следует отметить, что средний и минимально достижимый ПУБЛ при малых отклонениях координат элементов $\Delta < \lambda$ зависят от исходной конфигурации антенной решетки. Из этого следует, что для различных конфигураций исследуемый подход может иметь различную эффективность, которую в общем виде оценить возможно только проведением множества статистических экспериментов. При этом известно, что, чем выше уровень дифракционного максимума, тем более выраженной является формирующая его регулярность в структуре решетки, тем большую эффективность будет иметь нарушение этой регулярности. Таким образом, чем больше дифракционных лепестков соответствует конфигурации исходной регулярной решетки и чем выше их уровень, тем эффективнее результат применения предложенного метода.

Помимо дифракционных максимумов из-за случайного компонента разрушаются также и минимумы множителя решетки [10, 23-24]. Это может привести к увеличению среднего уровня боковых лепестков (СУБЛ), который также является случайным. СУБЛ определяется как среднее значение множителя решетки за пределами главного луча (среднее арифметическое по выборке). Границы главного луча при моделировании определены по уровню -20 дБ.

Зависимость среднего значения или математического ожидания СУБЛ от Δ приведена на рис. 10.

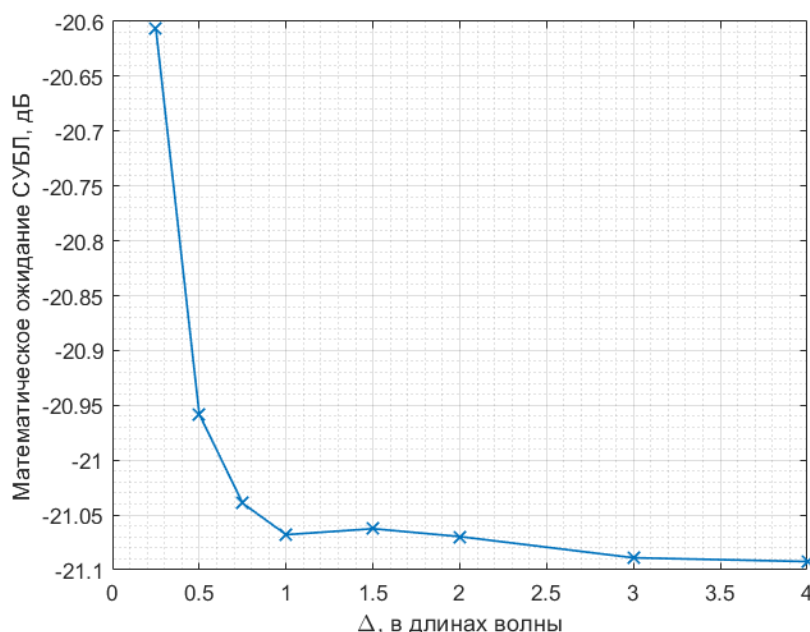


Рис. 10. Зависимости среднего значения СУБЛ от ширины диапазона отклонения координат элементов ММО антенной решетки.

Результаты на рис. 10 показывают, что при увеличении диапазона отклонения координат элементов математическое ожидание СУБЛ меняется слабо. Изменения около 0.6 дБ заметны для значений Δ , при которых преобладает регулярный компонент в конфигурации решетки (до $\Delta \approx \lambda$). При преобладании случайного компонента можно считать, что математическое ожидание среднего уровня бокового лепестка не зависит от Δ . Уменьшение среднего значения СУБЛ объясняется тем, что из-за отклонения координат элементов уровень дифракционных лепестков уменьшается существеннее, чем увеличивается уровень минимумов множителя решетки.

Таким образом, случайное отклонение координат элементов ММО антенной решетки регулярной конфигурации позволяет существенно снизить пиковый уровень бокового лепестка ее множителя направленности при почти неизменном математическом ожидании среднего уровня боковых лепестков. Реализация метода не потребует существенных и сложных изменений в конструкции антенной решетки, что обеспечивает его практическую ценность.

Наблюдаемая тенденция к «разрушению» исходной регулярной конфигурации при увеличении диапазона отклонений координат Δ , как и улучшение достижимого значения ПУБЛ, очевидно, является справедливой для общего случая антенной решетки с низкой плотностью размещения элементов. При этом условная граница значений диапазона отклонений, при которой в конфигурации перестает преобладать регулярный компонент, а начинает преобладать случайный, зависит от исходной конфигурации решетки. Для конфигурации на рис. 2, для которой проводились эксперименты в этом разделе, $\Delta \approx \lambda$. Влияние конфигурации решетки на значение этого параметра является темой отдельного исследования, которое будет проведено в дальнейшем.

Заключение

В работе предложен способ улучшения свойств направленности регулярных ММО антенных решеток, заключающийся в случайном отклонении координат ее реальных элементов на плоскости. Это позволяет снизить уровень дифракционных максимумов и уменьшить значение ПУБЛ при сохранении ширины главного луча.

Приведены зависимости среднего и минимального достижимого уровней пикового бокового лепестка, ширины главного луча в двух ортогональных угловых сечениях, среднего уровня боковых лепестков от ширины диапазона отклонения координат. Для конфигурации, представленной на рис. 2 возможно уменьшение уровня пикового бокового лепестка с ≈ -1 до ≈ -5 дБ уже при амплитуде отклонений $\Delta = 0.5\lambda$, что означает простую практическую реализацию предложенного способа. При этом следует отметить, что эффективность метода зависит от исходной конфигурации решетки.

При этом средний уровень боковых лепестков изменяется всего на величину около 0.6 дБ, что можно считать несущественным.

Показано, что предложенный способ оптимизации конфигурации ММО антенной решетки имеет ограничения. При больших значениях отклонений $\Delta \geq 2\lambda$ виртуальная апертура становится полностью случайной, что не позволяет

получить еще больший выигрыш в ПУБЛ без увеличения количества элементов в составе решетки.

В продолжение работы будут исследованы вероятностные характеристики ПУБЛ случайных ММО антенных решеток, рассмотрены вопросы их оптимизации. Будет оценено влияние конфигурации решетки на значение параметра Δ , при котором происходит смена преобладающего компонента в конфигурации решетки с регулярного на случайный.

Литература

1. Bergin J., Guerci J. R. MIMO radar: theory and application. – Artech House, 2018.
2. Fortunati S. et al. Massive MIMO radar for target detection //IEEE Transactions on Signal Processing. – 2020. – Т. 68. – С. 859-871.
3. Черняк В. С. Многопозиционные радиолокационные системы на основе ММО РЛС //Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – №. 8. – С. 29-47.
4. Li J., Stoica P. MIMO Radar Signal Processing. – 2009.
<https://doi.org/10.1002/9780470391488>
5. Grove R. L. MIMO radar Systems and Algorithms-Imperfections and Calibration. – 2022.
6. Fishler E. et al. MIMO radar: An idea whose time has come //Proceedings of the 2004 IEEE Radar Conference (IEEE Cat. No. 04CH37509). – IEEE, 2004. – С. 71-78. <https://doi.org/10.1109/NRC.2004.1316398>
7. Bliss D. W., Forsythe K. W. Multiple-input multiple-output (MIMO) radar and imaging: Degrees of freedom and resolution //The Thrity-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers, 2003. – IEEE, 2003. – Т. 1. – С. 54-59. <https://doi.org/10.1109/ACSSC.2003.1291865>
8. Alland S. W. et al. Virtual radar configuration for 2D array : пат. 9869762 США. – 2018.
9. Chen Z. K. et al. Sparse antenna array design for MIMO radar using multiobjective differential evolution //International Journal of Antennas and Propagation. – 2016. – Т. 2016. – №. 1. – С. 1747843. <https://doi.org/10.1155/2016/1747843>

10. Skolnik M. I. Radar Handbook 3ed. – McGraw Hill, 2008
11. Ширман Я. Д. и др. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник //Радиотехника. – 2007. – Т. 512.
12. Podkorayev A. O. et al. The Simulation Model of the MIMO Radar Antenna Array //2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2023. – С. 580-585. <https://doi.org/10.1109/APEIE59731.2023.10347624>
13. Stepanov M. A. et al. MIMO Antenna Array With a Randomized Arrangement of Elements Providing Specified Directional Properties //IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2025. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2025.3585276>
14. 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). – IEEE, 2022. – С. 97-100. <https://doi.org/10.1109/EDM55285.2022.9855099>
15. Официальный сайт Федеральной комиссии связи США (FCC). URL: <https://fcc.report/FCC-ID/> (дата обращения: 27.10.2025)
16. Pompei F. J. and Wooh S.-C. Phased array element shapes for suppressing grating lobes // J. Acoust. Soc. Amer., vol. 111, 2002, pp. 2040–2048.
17. Lin C.-H., Distributed subarray antennas for multifunction phased-array radar // M.S. thesis, Naval Postgraduate Sch., Monterey, CA, USA, 2003.
18. Feng B., Jenn D. C. Two-Way Pattern Grating Lobe Control for Distributed Digital Subarray Antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 63, No. 10, October 2015, pp. 4375-4383.
19. Feng B. and Jenn D. C. Grating lobe suppression for distributed digital subarrays using virtual filling // IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 12, 2013, pp. 1323–1326.
20. Chen W., Xu X., Wen S., and Cao Z. Super-resolution direction finding with far-separated subarrays using virtual array elements // IET Radar Sonar Navigat., vol. 5, no. 8, 2011, pp. 824–834.

21. Krivosheev Y. V., Shishlov A. V., Denisenko V. V. Grating Lobe Suppression in Aperiodic Phased Array Antennas Composed of Periodic Subarrays with Large Element Spacing // IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 57, No. 1, February 2015, pp.76-85.
22. Korn G. A., Korn T. M. Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review. – Courier Corporation, 2000.
23. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Т. 1 – Москва : Советское радио, 1966. – 728 с.
24. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Т. 2 – Москва : Советское радио, 1968. – 504 с.

Для цитирования:

Подкопаев А.О., Артюшенко В.В., Степанов М.А., Соколов В.С. Снижение уровня бокового лепестка множителя направленности регулярной ММО антенной решетки смещением положения ее реальных элементов. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.1.15>