

УДК 621.396.67

**ФОРМИРОВАНИЕ ПУЧНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХ ЛИНЕЙНЫХ АНТЕННЫХ
РЕШЕТОК, РАСПОЛОЖЕННЫХ ОРТОГОНАЛЬНО
ДРУГ ДРУГУ**

Д.А. Юзвик, М.А. Степанов

Новосибирский государственный технический университет

В работе рассмотрена задача формирования пучности электромагнитного поля в заданной точке с использованием двух одинаковых одномерных линейных антенных решеток, расположенных ортогонально друг другу и сфокусированных в одну точку пространства. Рассмотрен случай с равноудаленными от точки фокусировки антенными решетками. Показано, что при такой конфигурации антенных решеток формируется три области повышенной напряженности электрического поля. Получены соотношения, позволяющие определить геометрические размеры всех областей. Показана возможность применения к рассматриваемой конфигурации из двух взаимно ортогональных антенных решеток алгоритма компенсации смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля, ранее предложенного для линейных антенных решеток. Это позволило совместить все три зоны высокой напряженности электрического поля в окрестности требуемой точки. Рассмотрены особенности формирования нескольких максимумов амплитуды напряженности электрического поля и влияние компенсации смещения на положение этих областей максимума. Выполнено сравнение теоретических результатов и результатов моделирования.

Ключевые слова: антенные решетки, фокусировка, моделирование, пространственная селекция, беспроводные сети связи.

DOI: 10.17212/1727-2769-2025-1-51-70

Введение

Формирование максимума амплитуды напряженности электрического поля точно в заданной области пространства является задачей, которую необходимо решать для осуществления пространственной селекции устройств, функционирующих в беспроводных телекоммуникационных сетях [1, 2].

Известно, что при фокусировке антенных решеток в окрестностях точки синфазного сложения волн повышается напряженность электрического поля. Классически для повышения уровня напряженности электрического поля в окрестностях требуемой точки решается задача фокусировки антенных решеток. В работах [3–10] рассмотрены вопросы, касающиеся фокусировки одномерных линейных антенных решеток, и установлено, что максимум амплитуды напряженности электрического поля всегда смещен в сторону антенной решетки относительно точки фокусировки (синфазного сложения волн) из-за снижения интенсивности электромагнитной волны с ростом расстояния.

В работе [11] предложен способ компенсации этого смещения. Однако в этой же работе отмечается, что при этом происходит расширение области повышенной напряженности электрического поля в окрестности точки максимума.

Актуальность задачи, решаемой в данной работе, обусловливается тем, что в настоящее время разрабатываются сети шестого поколения, процесс разработки сталкивается с различными вызовами [12–19]. Нельзя не отметить, что число абонентов беспроводных сетей будет продолжать расти, рост числа абонентов приводит к снижению пропускной способности беспроводных сетей из-за снижения отношения сигнал/шум. Одним из способов борьбы с этим эффектом может быть формирование зон высокой напряженности в требуемых точках пространства.

Учитывая смещение максимума амплитуды напряженности электрического поля, задачи фокусировки антенной решетки и обеспечение максимума амплитуды напряженности электрического поля следует разделять. В настоящей работе решается задача обеспечения максимума амплитуды напряженности электрического поля в требуемой точке пространства.

Задача формирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства остается актуальной. Одним из способов решения поставленной задачи может быть использование двух антенных решеток, расположенных ортогонально друг другу и сфокусированных в одну точку пространства. Использование двух ортогональных друг другу антенных решеток, сфокусированных в одну точку пространства, на данный момент практически не изучено, что послужило целью настоящей работы – оценить возможности формирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в требуемой точке пространства с использованием двух ортогональных друг другу одномерных линейных антенных решеток.

1. Две ортогональные антенные решетки, сфокусированные в одну точку, равноудаленную от них

Рассмотрим случай равноудаленных от точки фокусировки антенных решеток. Схематичное представление конфигурации антенных решеток показано на рис. 1. Расстояние до точки, в которой обеспечивается максимум напряженности электрического поля, от первой антенной решетки F_x , от второй – F_y ; $F_x = F_y$. Антенные решетки AP 1 и AP 2 имеют равные линейные размеры, количество элементов и шаг между элементами. AP 1 и AP 2 работают на одной частоте.

Рассмотрим случай, когда обе антенные решетки сфокусированы в точку, где требуется обеспечить максимум напряженности электрического поля.

Известно, что при фокусировке антенной решетки максимум амплитуды напряженности электрического поля оказывается смещен в сторону антенной решетки относительно точки синфазного сложения волн [3–10].

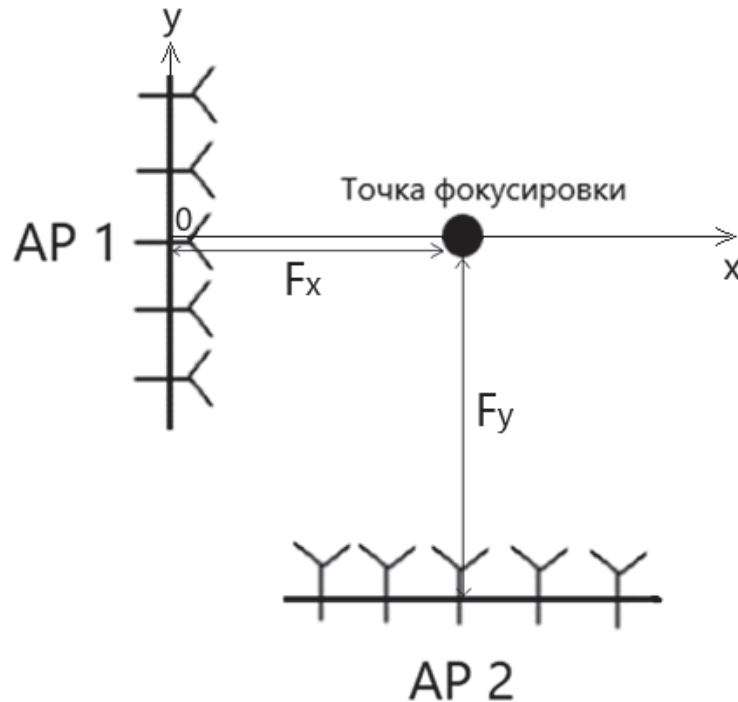


Рис. 1 – Конфигурация двух ортогонально расположенных антенных решеток

Fig. 1 – Configuration of two orthogonally located antenna arrays

На рис. 2 схематически изображен процесс формирования максимумов амплитуды напряженности электрического поля для двух расположенных ортогонально друг другу антенных решеток, сфокусированных в одну точку пространства. На рис. 2, а, б представлены зависимости амплитуды напряженности электрического поля для каждой из двух антенных решеток без учета влияния соседней антенной решетки. Демонстрируется уже известное смещение максимума амплитуды напряженности электрического поля относительно точки синфазного сложения волн, т. е. каждая антенная решетка формирует смещенный в свою сторону максимум амплитуды напряженности электрического поля. На рис. 2, в показан принцип формирования третьего максимума амплитуды напряженности электрического поля за счет пересечения главных лепестков диаграмм направленности антенных решеток. В точке фокусировки электромагнитные волны, излучаемые антенными решетками, суммируются, приходя синфазно. Размер зоны повышенной напряженности в окрестностях третьего максимума зависит от ширины главного лепестка диаграммы направленности антенных решеток. На рис. 2, г показана схематическая зависимость амплитуды напряженности электрического поля вдоль оси x . На рисунке видно, что будет формироваться смещенный в сторону антенной решетки максимум амплитуды напряженности электрического поля. Смещение происходит из-за влияния эффекта снижения интенсивности электромагнитной

волны с ростом расстояния, что более подробно рассмотрено в [1, 10]. Кроме того, будет формироваться максимум амплитуды напряженности электрического поля в заданных координатах фокусировки антенных решеток за счет пересечения диаграммы направленности, за счет сложения сигналов от двух антенных решеток. Ожидается, что уровень амплитуды напряженности электрического поля в первом и втором максимуме может быть ниже, чем уровень напряженности в третьем максимуме.

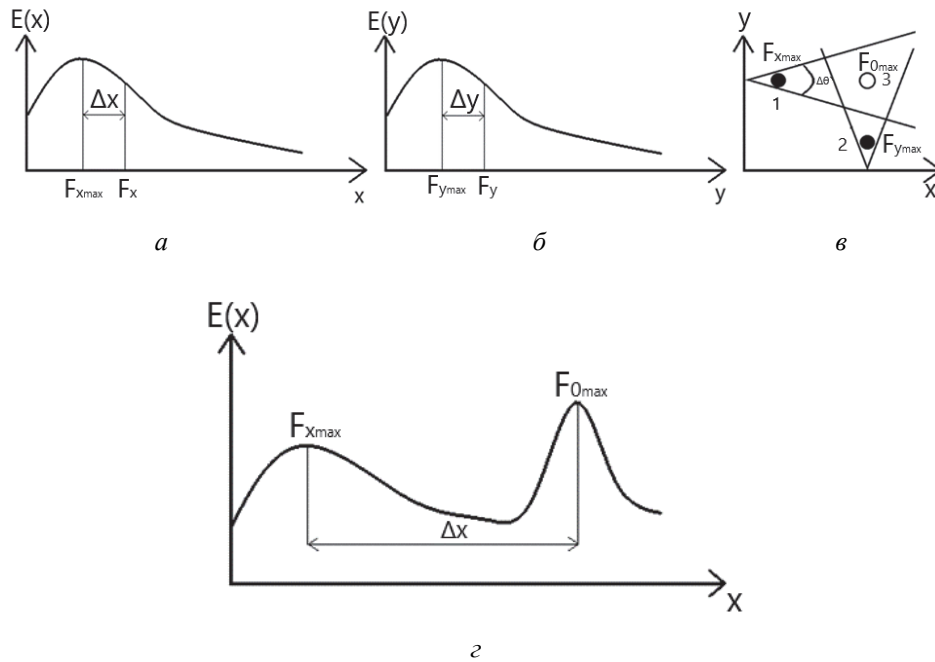


Рис. 2 – Схематичное представление влияния антенных решеток на формирование максимумов амплитуды напряженности электрического поля:

a – зависимость амплитуды напряженности только для АР 1; *б* – зависимость амплитуды напряженности только для АР 2; *в* – образование третьего максимума амплитуды напряженности за счет пересечения ДН АР 1 и АР 2; *г* – зависимость амплитуды напряженности электрического поля вдоль оси x с учетом влияния АР 2

Fig. 2 – Schematic representation of the influence of antenna arrays on the formation of maxima of the electric field amplitude:

a – dependence of the amplitude of the field strength only for AA 1; *b* – dependence of the amplitude of the field strength only for AA 2; *c* – formation of the third maximum of the amplitude of the field strength due to the intersection of the RP of AA 1 and AA 2; *d* – dependence of the amplitude of the electric field strength along the x axis taking into account the influence of AA 2

Таким образом, рассматриваемая конфигурация антенных решеток будет формировать три точки высокой напряженности электрического поля.

Введем терминологию относительно обозначения максимумов амплитуды напряженности электрического поля: максимумы амплитуды напряженности электрического поля, формируемые АР1 и АР2 (F_{xmax}

и $F_{y\max}$), будем называть первым и вторым максимумом амплитуды напряженности соответственно; максимум амплитуды напряженности электрического поля, формируемый за счет пересечения главных лепестков диаграмм направленности ($F_{0\max}$) будем называть третьим максимумом амплитуды напряженности.

1.1. Две ортогональные антенные решетки, сфокусированные в одну точку, равноудаленную от них

В работе [11] приведены нормированные к фокусному расстоянию зависимости, связывающие величину смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля и линейные размеры антенной решетки. Приведенные зависимости были аппроксимированы полиномом третьей степени (1), коэффициенты полинома приведены в табл. 1 [11]. Величины смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля, определяемые при помощи полинома, будем называть определенными теоретически.

$$\frac{\Delta R}{F}(x, z) = a_1 x^3 + a_2 x^2 z + a_3 x^2 + a_4 x z^2 + a_5 x z + a_6 x + a_7 z^3 + a_8 z^2 + a_9 z + a_{10}. \quad (1)$$

Таблица 1 [11] / Table 1

Коэффициенты аппроксимирующего полинома
Coefficients of the approximating polynomial

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
-0,18421	$9,1928 \cdot 10^{-5}$	0,84448	$-4,7901 \cdot 10^{-9}$	-0,00010107
a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
-1,6828	$-5,136 \cdot 10^{-11}$	$3,4927 \cdot 10^{-7}$	0,00082625	1,8332

Размер зоны повышенной напряженности электрического поля в окрестностях третьего максимума амплитуды напряженности электрического поля ($F_{0\max}$) будет определяться обеими антенными решетками вдоль осей x и y и будет зависеть от размеров антенной решетки, фокусного расстояния и ширины диаграммы направленности антенной решетки. На рис. 3 изображено схематичное представление влияния ширины диаграммы направленности на размер зоны повышенной напряженности электрического поля.

Для расчета размеров области повышенной напряженности в окрестностях третьего максимума амплитуды напряженности электрического поля ($F_{0\max}$) необходимо знать ширину главного лепестка диаграммы направленности антенной решетки.

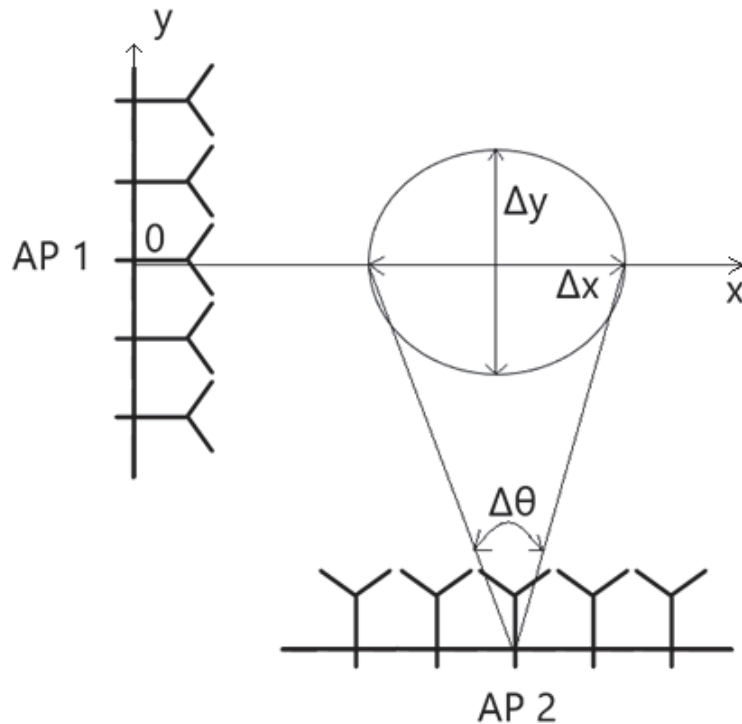


Рис. 3 – Схематичное представление влияния диаграммы направленности на размеры зоны повышенной напряженности электрического поля

Fig. 3 – Schematic representation of the influence of the radiation pattern on the size of the zone of increased electric field intensity

При равномерном распределении поля по апертуре антенны ширину главного лепестка диаграммы направленности по уровню -3 дБ можно оценить по следующему выражению [20]:

$$\Delta\theta = 51^\circ \frac{\lambda}{L}, \quad (2)$$

где L – линейный размер антенной решетки.

Тогда размер зоны повышенной напряженности вдоль оси x , формируемый AP 2:

$$\Delta x = 2F \operatorname{tg} \left(\frac{\Delta\theta}{2} \right), \quad (3)$$

где F – фокусное расстояние; θ – ширина главного лепестка диаграммы направленности.

Аналогичным образом по соотношениям (2) и (3) определяется размер области вдоль оси y , определяемый AP 1. Очевидно, в этом случае в указанные выражения подставляются параметры AP 1.

Очевидно, что размеры зоны повышенной напряженности, формируемые двумя ортогональными антенными решетками, сфокусированные

в одну точку пространства, будут отличаться от размеров зоны повышенной напряженности, формируемых одной антенной решеткой. Это связано с интерференцией излучения обеих антенных решеток. Чтобы подтвердить утверждение, нормируем напряженность электрического поля, формируемую двумя антенными решетками к напряженности электрического поля в точке синфазного сложения волн. Очевидно, что в таком случае в точке фокусировки напряженность поля будет равна 0 дБ или относительной единице (ОЕ). Тогда уровень напряженности электрического поля, формируемый одной антенной решеткой в этой точке, будет составлять –6 дБ (0,5 ОЕ). Следовательно, становится очевидно, что уровень напряженности электрического поля на границах главного лепестка диаграммы направленности по уровню –3 дБ составит –9 дБ (0,355 ОЕ).

Следующий шаг: к вычислениям добавим излучение второй антенной решетки и вычислим значение напряженности электрического поля в точке на границе главного лепестка диаграммы направленности по уровню –3 дБ: 0,355 ОЕ (–9 дБ) + 0,5 ОЕ (–6 дБ) = 0,856 ОЕ (–1,35 дБ). Из результата вычислений становится понятно, что с учетом влияния излучения от второй антенной решетки размер зоны повышенной напряженности не ограничивается шириной главного лепестка диаграммы направленности по уровню –3 дБ. Путем вычислений было установлено, что ширина главного лепестка диаграммы направленности антенной решетки, по которому ограничиваются размеры зоны повышенной напряженности, должна составлять –13,7 дБ (0,207 ОЕ).

Это несложно подтвердить следующим образом: возьмем нормированный уровень напряженности электрического поля, создаваемый первой антенной решеткой, который составляет 0,5 ОЕ (–6 дБ) и прибавим к нему уровень напряженности электрического поля, создаваемый второй антенной решеткой по уровню –13,7 дБ, что в относительных единицах составит 0,207 ОЕ. В результате получится 0,708 ОЕ или напряженность по уровню –3 дБ относительно точки синфазного сложения волн. Схематичное представление описанных выше тезисов представлено на рис. 4.

Следовательно, становится очевидно, что размер зоны повышенной напряженности по уровню –3 дБ для двух одинаковых ортогональных друг другу антенных решеток необходимо вычислять для ширины главного лепестка диаграммы направленности антенной решетки по уровню –13,7 дБ. Для вычисления можно воспользоваться следующим соотношением:

$$\Delta\theta = 93^\circ \frac{\lambda}{L}. \quad (4)$$

Полученное по выражению (4) значение подставляется в выражение (3) для вычисления размеров зоны повышенной напряженности по уровню –3 дБ.

Проведем расчет зависимости амплитуды напряженности электрического поля от координат для двух антенных решеток, сфокусированных в одну точку пространства и расположенных ортогонально относительно друг друга. Пусть точка фокусировки будет на расстоянии $F = 2000$ мм для обеих антенных решеток. Центральная частота – 2,5 ГГц. Результаты расчетов представлены на рис. 6.

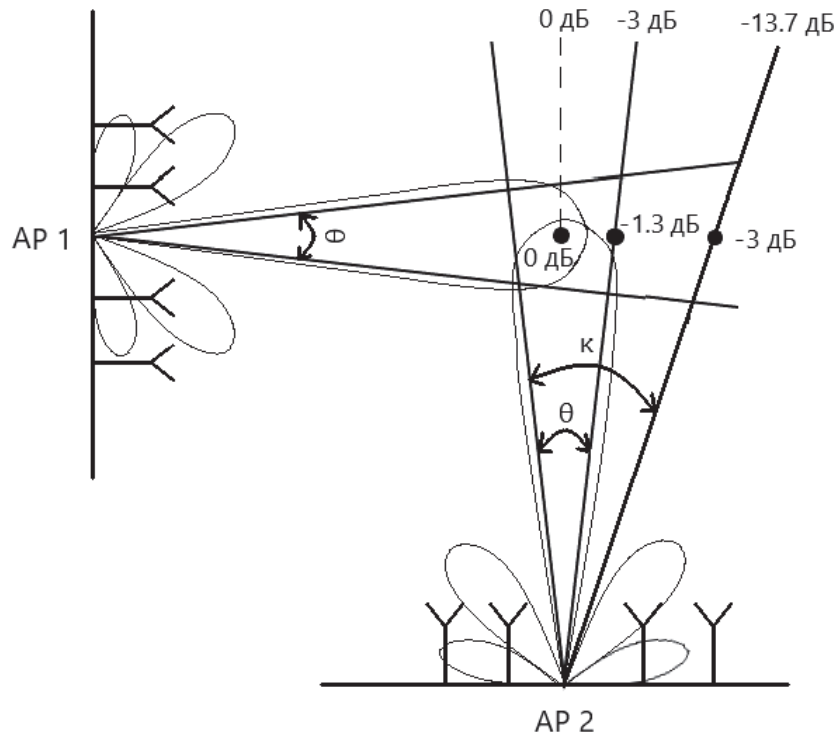


Рис. 4 – Уровни напряженности электрического поля с учетом излучения от второй антенной решетки

Fig. 4 – Electric field strength levels taking into account radiation from the second antenna array

Расчет проводили по соотношениям, описанным в [11], которые в двумерной интерпретации приняли следующий вид.

1. Для расчета амплитуды напряженности электрического поля систему «антенные решетки–пространство» необходимо разбить на сетку с настраиваемым шагом. Величина шага будет определять количество точек (узлов сетки) в пространстве, в которых будет выполняться расчет амплитуд напряженности электрического поля. На рис. 5 представлен фрагмент сетки, на которую разбивается пространство. Узлы сетки – точки, в которых выполняется расчет амплитуд напряженности электрического поля.

Задав шаг разбиения и размеры анализируемой области пространства, получим сетку, состоящую из Ng узлов. Количество узлов сетки определяется выражением

$$Ng = \frac{(X_{fin} - X_{start})}{\Delta X} + \frac{(Y_{fin} - Y_{start})}{\Delta Y} + \frac{(Z_{fin} - Z_{start})}{\Delta Z}, \quad (5)$$

где $X_{start}, Y_{start}, Z_{start}$ – координаты начала области разбиения; $X_{fin}, Y_{fin}, Z_{fin}$ – координаты конца области разбиения; $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ – шаг разбиения по соответствующим координатам.

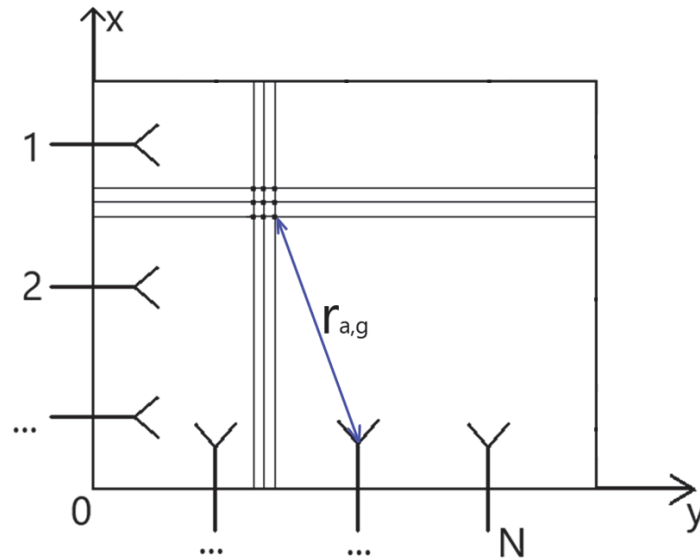


Рис. 5 – Система «антенные решетки–пространство»

Fig. 5 – Antenna Array-Space System

Пронумеруем узлы сетки. Нумерацию осуществим линейно, слева направо снизу вверх. Для расчета распределения напряженности электрического поля в каждом узле сетки необходимо определить напряженность, создаваемую каждой из излучающих антенн. Таким образом для всей анализируемой области пространства необходимо рассчитать $N \cdot Ng$ значений напряженности. Рассмотрим выражения, позволяющие осуществить этот расчет. С учетом того, что размер анализируемой области существенно превышает длину волны, будем использовать подходы геометрической оптики без учета дифракционных явлений [21].

2. Вычислим расстояние между каждым парциальным излучателем и каждым узлом сетки, на которую разбито пространство. Расстояние вычисляется по следующему выражению [2,11]:

$$r_{a,g} = \sqrt{(a_a - x_g)^2 + (b_a - y_g)^2 + (c_a - z_g)^2}, \quad (6)$$

где x_g, y_g, z_g – декартовы координаты узла сетки; a_a, b_a, c_a – координаты точки излучения (парциальный излучатель антенной решетки); g – номер узла сетки; a – номер излучателя.

3. Зная расстояние между излучателями антенных решеток и каждым узлом сетки, вычислим комплексный коэффициент передачи от каждого излучателя до каждого узла сетки. Для этого воспользуемся выражением:

$$K_{a,g} = g_{a,g}(\alpha, \theta) r_{a,g}^{-q} \exp(-j\beta r_{a,g}), \quad (7)$$

где $g_{a,g}(\alpha, \theta)$ – коэффициент усиления антенны по полю в направлении требуемого узла сетки (α – азимут; θ – угол места), $r_{a,g}$ – расстояние

между точкой излучения и узлом сетки; q – указывает, по какому закону происходит снижение интенсивности электромагнитной волны с ростом расстояния ($q = 1$ для дальней зоны, $q = 2$ для ближней зоны, $q = 0$ – теоретический случай без учета снижения интенсивности); $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ – коэффициент фазы.

4. Очевидно, что значение амплитуды напряженности электрического поля в каждом узле сетки является суперпозицией волн, приходящих в узел сетки от каждого излучателя антенных решеток. Результирующее значение амплитуды напряженности электрического поля в узле сетки рассчитывается по следующему выражению:

$$E_{\Sigma g} = \sum_{a=0}^{N-1} A_a \cdot K_{a,g}, \quad (8)$$

где A_a – значение амплитуды сигнала в точке излучения.

Для моделирования рассмотрим ортогональные конфигурации, состоящие из антенных решеток с параметрами:

1. $N = 20$; $d/\lambda = 0,5$;
2. $N = 15$; $d/\lambda = 0,5$;
3. $N = 12$; $d/\lambda = 0,5$,

где d/λ – отношение расстояния между элементами антенной решетки к рабочей длине волны; N – количество элементов.

Выбор антенн и шага между элементами АР обоснован тем, что величина смещения максимума зависит только от отношения линейных размеров антенной решетки к фокусному расстоянию и не зависит от количества излучателей в антенной решетке [1]. Поэтому выбраны антенные решетки, которые при одиночном использовании обеспечивают различные смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля [1, 10].

На рис. 6 представлена зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния для двух ортогонально расположенных антенных решеток с параметрами $N = 20$; $d/\lambda = 0,5$. Для других рассмотренных антенных решеток изображение качественно совпадает с представленным, различаясь лишь размером области высокой напряженности (см. табл. 2).

На рисунке видно чередование максимумов и минимумов амплитуды напряженности электрического поля в пределах обозначенной области высокой напряженности связанной с интерференцией двух электромагнитных волн. Это связано с явлением стоячей волны. Уравнение, описывающее стоячую волну, которая сформирована двумя волнами, имеющими равную амплитуду и частоту, можно записать в виде

$$A(x, t) = A_0 \cos(\beta x - \varphi_0) \cos(\omega t), \quad (9)$$

где A_0 – амплитуда; β – коэффициент фазы; ω – круговая частота; x – координата расстояния; φ_0 – разность начальных фаз колебаний.

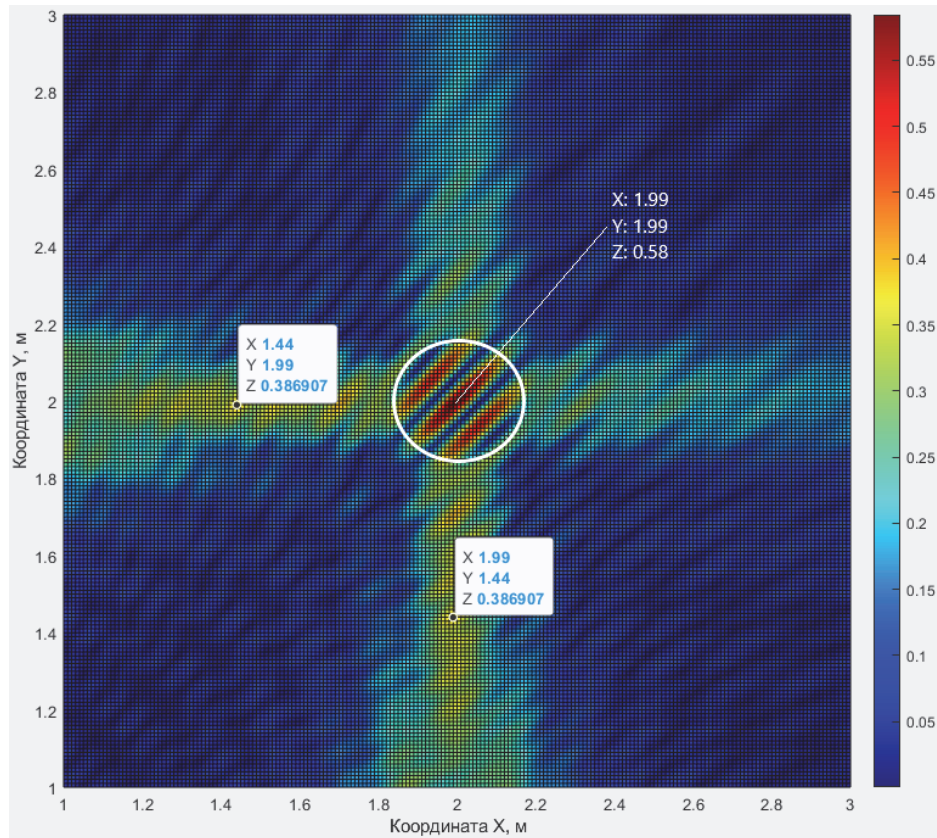


Рис. 6 – Трехмерная зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния для двух ортогонально расположенных антенных решеток с параметрами $N = 20$; $d/\lambda = 0,5$

Fig. 6 – Three-dimensional dependence of the amplitude of the electric field strength on the distance for two orthogonally located antenna arrays with parameters $N = 20$; $d/\lambda = 0,5$

Из (9) видно, что расположение максимумов амплитуды напряженности электрического поля будет зависеть от значений разности начальных фаз φ_0 .

По данным, показанным на рис. 6, можно заметить, что максимум амплитуды напряженности электрического поля диагонально смещен относительно требуемой точки максимума (точки синфазного сложения волн), но это смещение не превышает долей процента относительно величины фокусного расстояния. Размеры зоны повышенной напряженности в окрестностях третьего максимума амплитуды напряженности $F_{0\max}$ зависят от ширины главного лепестка диаграммы направленности АР 2. Необходимо отметить, что величины смещения первого и второго максимумов амплитуды напряженности электрического поля ($F_{x\max}$ и $F_{y\max}$) в ортогональной конфигурации антенных решеток зависят от линейных размеров антенной решетки и совпадают с теоретическими результатами [1, 10].

Отметим, что результаты расчетов для антенных решеток с параметрами $N = 15$; $d/\lambda = 0,5$ и $N = 12$; $d/\lambda = 0,5$ не противоречат результатам, приведенным на рис. 6.

Оценим теоретически $(\Delta R_{T,X}; \Delta R_{T,Y})$ [1, 10] и получим в результате моделирования $(\Delta R_{M,X}; \Delta R_{M,Y})$ величины смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля относительно максимумов, формируемых антенными решетками по отдельности ($F_{x\max}$ и $F_{y\max}$). Результаты сведены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

**Теоретическое смещение максимума амплитуды напряженности
и результат моделирования**
**Theoretical shift of the maximum amplitude of the stress and the result of the
simulation**

N	$\Delta R_{T,X}$, мм	$\Delta R_{T,Y}$, мм	$\Delta R_{M,X}$, мм	$\Delta R_{M,Y}$, мм
20	574.2	574.2	560	560
15	918	918	840	840
12	1230.4	1230.4	1210	1210

По табл. 2 легко заметить, что величины смещения максимума амплитуды напряженности, рассчитанные теоретически [1, 10] и полученные в результате моделирования совпадают.

В табл. 3 сведены размеры зоны повышенной напряженности в окрестностях третьего максимума ($F_{0\max}$) для рассматриваемых антенных решеток, полученные в результате моделирования (ΔD) и рассчитанные по выражению (3) для АР 2 вдоль оси x (ΔD_x) [1, 10]. Учитывая, что АР 1 и АР 2 имеют одинаковые параметры и находятся на равном расстоянии от точки фокусировки, размер зоны повышенной напряженности вдоль оси y будет равен размеру вдоль оси x .

Таблица 3 / Table 3

Размеры зоны повышенной напряженности электрического поля
Dimensions of the zone of increased electric field intensity

N	ΔD , мм	ΔD_x , мм	$\Delta \theta$, град.
20	310	325	5,1
15	430	434	6,8
12	540	544	8,5

Размеры зоны повышенной напряженности, полученные в результате моделирования, численно близки с полученными теоретически, отличия объясняются влиянием излучения соседней антенной решетки.

Размер третьей зоны повышенной напряженности зависит от ширины главного лепестка диаграммы направленности антенной решетки. Следо-

вательно, размер зоны повышенной напряженности зависит от рабочей частоты антенной решетки и ее линейных размеров.

Таким образом, для двух взаимно ортогональных антенных решеток, обеспечивающих максимум напряженности в заданной точке пространства, имеем следующее.

1. Формируется три отдельные зоны высокой напряженности электрического поля. Формирование двух зон определяется смещением максимума напряженности электрического поля относительно точки фокусировки. Третья зона формируется в окрестностях требуемой точки за счет пересечения главных лепестков диаграмм направленности двух антенных решеток.

2. Очевидным шагом является совмещение трех зон повышенной напряженности.

1.2. Компенсация смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля для двух ортогональных антенных решеток, сфокусированных в одну точку, равноудаленную от них

Целью подраздела является компенсация смещения двух зон высокой напряженности относительно заданной точки пространства.

В работе [11] предложен алгоритм компенсации смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля. Для этого предлагается фокусировать антенную решетку на более дальнее расстояние, чем то, где требуется обеспечить максимум напряженности электрического поля. Новое фокусное расстояние подбирается таким, чтобы смещенный относительно него максимум напряженности электрического поля попадал в точку с требуемыми координатами. Компенсацию смещения предлагается проводить итерационным способом, пошагово увеличивая фокусное расстояние для антенной решетки [11].

Применим итерационный алгоритм компенсации смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля. Компенсацию смещения выполним для конфигурации $N = 20$; $d / \lambda = 0,5$. После выполнения шагов итерационного алгоритма компенсации для антенной решетки ($N = 20$) обе антенные решетки необходимо сфокусировать на расстояние $F_x = F_y = 3900$ мм. Трехмерная зависимость амплитуды напряженности электрического поля от координаты для скомпенсированного случая представлены на рис. 7.

Сравнивая результаты, показанные на рис. 6 и 7, можно заметить, что при компенсации смещения антенной решетки исчезли первый и второй максимумы амплитуды напряженности электрического поля в непосредственной близости антенных решеток ($F_{x\max}$ и $F_{y\max}$), остался только третий максимум амплитуды напряженности электрического поля ($F_{0\max}$). В точках, в которых находился первый и второй максимум после компенсации, сформировались минимумы напряженности электрического поля. Стоит отметить, что нормированная к амплитуде излучаемого сигнала напряженность поля в точке максимума для скомпенсированного

случая ниже, чем для случая без применения компенсации: до компенсации величина напряженности третьего максимума составляла 0,58, после компенсации – 0,46; т. е. значение напряженности снизилось более чем на 20 %.

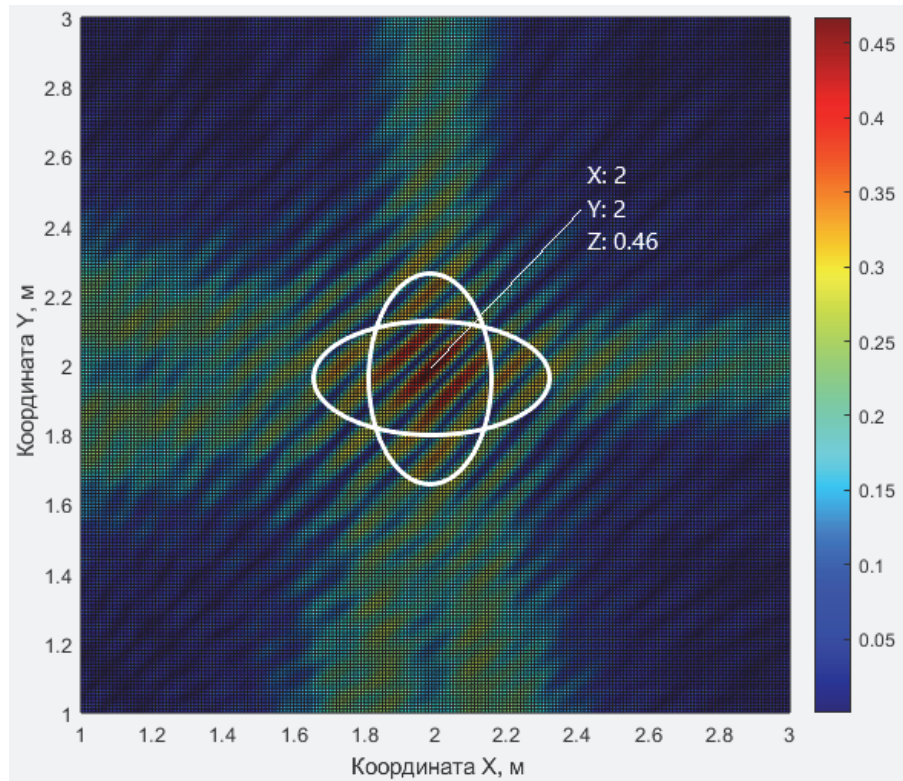


Рис. 7 – Трехмерная зависимость амплитуды напряженности электрического поля для скомпенсированного случая

Fig. 7 – Three-dimensional dependence of the amplitude of the electric field strength for the compensated case

Снижение напряженности электрического поля в точке максимума после компенсации связана с тем, что размер зоны повышенной напряженности электрического поля по уровню -3 дБ увеличился. Площадь зоны повышенной напряженности можно приблизительно оценить как площадь эллипса, для этого воспользуемся известными соотношениями [22]:

$$S = \pi ab, \quad (10)$$

где a и b – размеры большой и малой полуоси эллипса соответственно.

Из рис. 7 видно, что зона повышенной напряженности после компенсации представляет пересечение двух эллипсов, следовательно площадь двух одинаковых пересекающихся эллипсов будет иметь вид [22]

$$S_{\text{общ}} = 2S - \left(4ab \arctg\left(\frac{b}{a}\right) \right). \quad (11)$$

Площадь зоны повышенной напряженности до компенсации (см. рис. 6) 0,075 м². Тогда как после компенсации (рис. 7) площадь зоны повышенной напряженности составила 0,125 м². Таким образом, площадь зоны повышенной напряженности после компенсации увеличилась более чем в 1,5 раза. Увеличение площади зоны повышенной напряженности связано с тем, что при увеличении фокусного расстояния энергия распределяется в большем диапазоне координат, формируя большую зону повышенной напряженности электрического поля [1], следствием этого является снижение уровня напряженности электрического поля в требуемой точке максимума. Также при компенсации смещения первого и второго максимума амплитуды напряженности электрического поля в точке образования третьего максимума не обеспечивается синфазное сложение волн от элементов антенной решетки в точке максимума, что тоже влияет на итоговое значение напряженности электрического поля.

Для всех рассмотренных антенных решеток площади зоны повышенной напряженности без компенсации и после ее применения приведены в табл. 4.

Таблица 4/ Table 4

Площадь зоны повышенной напряженности
Area of the high-tension zone

N	Площадь без компенсации смещения, м ²	Размеры полуосей эллипса до компенсации смещения		Площадь после компенсации смещения, м ²	Размеры полуосей эллипса после компенсации смещения	
		a, м	b, м		a, м	b, м
20	0,075	0,155	0,155	0,125	0,275	0,09
15	0,145	0,215	0,215	0,253	0,39	0,13
12	0,229	0,270	0,270	0,374	0,47	0,16

Из вышеописанного следует, что при использовании двух антенных решеток, ортогонально расположенных относительно друг друга, можно обеспечить формирование трех максимумов амплитуды напряженности электрического поля. Это может быть полезно при селекции беспроводных телекоммуникационных устройств, которые пространственно разнесены. Применение компенсационного алгоритма позволяет управлять положением первого и второго максимума напряженности электрического поля вдоль оси x для AP 1 (первый максимум) и вдоль оси y для AP 2 (второй максимум). Таким образом возможно формирование конфигурации электрического поля, в которой третий максимум статично расположен в заданной точке пространства, а положения первого и второго максимумов можно изменять вдоль оси x и y соответственно.

Заключение

Использование ортогонально расположенных антенных решеток, сфокусированных в одну точку пространства, позволяет обеспечить три точки максимума амплитуды напряженности электрического поля. Формирова-

ние двух зон определяется смещением максимума напряженности электрического поля относительно точки фокусировки ($F_{x\max}$ и $F_{y\max}$). Третья зона ($F_{0\max}$) формируется в окрестностях требуемой точки за счет пересечения главных лепестков диаграмм направленности двух антенных решеток.

Показано, что ранее предложенный для одномерных антенных решеток алгоритм компенсации смещения точки максимальной амплитуды напряженности электрического поля относительно требуемого положения может быть использован для управления местоположением двух областей высокой напряженности электрического поля при использовании двух взаимно ортогональных линейных антенных решеток.

Показано, что при компенсации смещения двух максимумов напряженности электрического поля, напряженность в требуемой точке снижается, а площадь области высокой напряженности в окрестности этой точки расширяется.

Теоретические результаты подтверждены моделированием.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Iuzvik D.A., Stepanov M.A.** Focusing the radiation of wireless data transmission networks at given points in space // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – IEEE, 2022. – P. 93–96.
2. **Iuzvik D.A., Stepanov M.A.** Focusing of the electromagnetic field in several given areas of space // Progress in Electromagnetics Research M. – 2022. – Vol. 113. – P. 11–22.
3. **Karimkashi S., Kishk A.A.** Focused microstrip array antenna using a Dolph-Chebyshev near-field design // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2009. – Vol. 57 (12). – P. 3813–3820.
4. Near field multifocusing on antenna arrays via non-convex optimisation / J. Álvarez, R.G. Ayestarán, G. León, L.F. Herrán, A. Arboleya, J.A. López-Fernández, F. Las-Heras // IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2014. – Vol. 8 (10). – P. 754–764.
5. A focused planar microstrip array for 2.4 GHz RFID readers / A. Buffi, A.A. Serra, P. Nepa, H.-T. Chou, G. Manara // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2010. – Vol. 58 (5). – P. 1536–1544.
6. **Hansen R.** Focal region characteristics of focused array antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1985. – Vol. 33 (12). – P. 1328–1337.
7. Near-field focused array microstrip planar antenna for medical applications / F. Tofigh, J. Nourinia, M. Azarmanesh, K.M. Khazaei // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2014. – Vol. 13. – P. 951–954.
8. Single-layer metasurface focusing lens for medical applications / Y. Xiao, L. Wu, S.S. Peng, Z.L. Xiao // 2019 IEEE MTT-S International Microwave Biomedical Conference (IMBioC). – IEEE, 2019. – Vol. 1. – P. 1–3.
9. Auto focus for far field source localization using emission source microscopy / L. Zhang, S. Yong, Y. Liu, V. Khilkevich // 2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium. – IEEE, 2021. – P. 115–118.
10. **Iuzvik D.A., Stepanov M.A.** Formation of the electric field strength maximum at a given point in space by a focused linear antenna array // 2023 IEEE 24th Interna-

- tional Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – IEEE, 2023. – P. 350–354.
11. **Iuzvik D.A., Stepanov M.A.** Ensuring the maximum amplitude of the electric field strength in given coordinates using a linear antenna array focused on a finite distance // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. – 2024. – Vol. 38 (4). – P. 411–427.
 12. How organic networking meets 6G campus network management challenges / M.-I. Corici, F. Eichhorn, V. Gowtham, T. Magedanz, E.-R. Modroiu, F. Schreiner // *2023 26th Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks and Workshops (ICIN)*. – IEEE, 2023. – P. 169–173.
 13. Computing power network: the architecture of convergence of computing and networking towards 6G requirement / X. Tang, C. Cao, Y. Wang, S. Zhang, Y. Liu, M. Li, T. He // *China Communications*. – 2021. – Vol. 18 (2). – P. 175–185.
 14. 6G cell-free network architecture / J. Zong, Y. Liu, H. Liu, Q. Wang, P. Chen // *2022 IEEE 2nd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI)*. – IEEE, 2022. – P. 421–425.
 15. Organic 6G networks: decomplexification of software-based core networks / M. Corici, E. Troudt, T. Magedanz, H. Schotten // *2022 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*. – IEEE, 2022. – P. 541–546.
 16. Space-air-ground integrated network (SAGIN) for 6G: requirements, architecture and challenges / H. Cui, J. Zhang, Y. Geng, Z. Xiao, T. Sun, N. Zhang, J. Liu, Q. Wu, X. Cao // *China Communications*. – 2022. – Vol. 19 (2). – P. 90–108.
 17. Intelligent decision making framework for 6G network / Z. Hu, P. Zhang, C. Zhang, B. Zhuang, J. Zhang, S. Lin, T. Sun // *China Communications*. – 2022. – Vol. 19 (3). – P. 16–35.
 18. Scattering effect up to 100 GHz band for 6G / M. Inomata, W. Yamada, N. Kuno, M. Sasaki, K. Kitao, M. Nakamura, H. Ishikawa, Y. Oda // *2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*. – IEEE, 2021. – P. 749–750.
 19. **Ziegler V., Yrjölä S.** How to make 6G a general purpose technology: prerequisites and value creation paradigm shift // *2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*. – IEEE, 2021. – P. 586–591.
 20. **Hansen R.C.** *Phased array antennas*. – Hoboken: Wiley, 2009. – 547 p.
 21. **Keller J.B.** Geometrical theory of diffraction // *Journal of the Optical Society of America*. – 1962. – Vol. 52 (2). – P. 116.
 22. **Mauch S.** *Introduction to methods of applied mathematics or advanced mathematical methods for scientists and engineers*. – California Institute of Technology, 2004.

FORMATION OF AN ANTINODE OF AN ELECTROMAGNETIC FIELD USING TWO LINEAR ANTENNA ARRAYS LOCATED ORTHOGONALLY TO EACH OTHER

Iuzvik D.A., Stepanov M.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The paper considers the problem of forming an antinode of the electromagnetic field at a given point using two identical one-dimensional linear antenna arrays located orthogonally to each other and focused at one point in space. The case with antenna arrays

equidistant from the focusing point is considered. It is shown that with such a configuration of antenna arrays, three areas of increased electric field strength are formed. Relationships are obtained that make it possible to determine the geometric dimensions of all areas. The possibility of applying the algorithm for compensating for the shift of the maximum amplitude of the electric field strength, previously proposed for linear antenna arrays, to the considered configuration of two mutually orthogonal antenna arrays is shown. This made it possible to combine all three areas of high electric field strength in the vicinity of the desired point. The features of forming several maxima of the amplitude of the electric field strength and the effect of compensation for the shift on the position of these maximum areas are considered. A comparison of theoretical and simulation results is performed.

Keywords: antenna arrays, focusing, modeling, spatial selection, wireless communication networks.

DOI: 10.17212/1727-2769-2025-1-51-70

REFERENCES

1. Iuzvik D.A., Stepanov M.A. Focusing the radiation of wireless data transmission networks at given points in space. *2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*. IEEE, 2022, pp. 93–96.
2. Iuzvik D.A., Stepanov M.A. Focusing of the electromagnetic field in several given areas of space. *Progress In Electromagnetics Research M*, 2022, vol. 113, pp. 11–22.
3. Karimkashi S., Kishk A.A. Focused microstrip array antenna using a Dolph-Chebyshev near-field design. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, vol. 57 (12), pp. 3813–3820.
4. Álvarez J., López-Fernández J.A., Las-Heras F., Arbolea A., Herrán L.F., Ayestarán R.G., León G. Near field multifocusing on antenna arrays via non-convex optimization. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2014, vol. 8 (10), pp. 754–764.
5. Buffi A., Serra A.A., Nepa P., Chou H.-T., Manara G. A focused planar microstrip array for 2.4 GHz RFID readers. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, vol. 58 (5), pp. 1536–1544.
6. Hansen R. Focal region characteristics of focused array antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1985, vol. 33 (12), pp. 1328–1337.
7. Tofigh F., Nourinia J., Azarmanesh M., Khazaei K.M. Near-field focused array microstrip planar antenna for medical applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, vol. 13, pp. 951–954.
8. Xiao Y., Wu L., Peng S.S., Xiao Z.L. Single-layer metasurface focusing lens for medical applications. *2019 IEEE MTT-S International Microwave Biomedical Conference (IMBioC)*. IEEE, 2019, vol. 1, pp. 1–3.
9. Zhang L., Yong S., Liu Y., Khilkevich V. Auto focus for far field source localization using emission source microscopy. *2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium*. IEEE, 2021, pp. 115–118.
10. Iuzvik D.A., Stepanov M.A. Formation of the electric field strength maximum at a given point in space by a focused linear antenna array. *2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*. IEEE, 2023, pp. 350–354.

11. Iuzvik D.A., Stepanov M.A. Ensuring the maximum amplitude of the electric field strength in given coordinates using a linear antenna array focused on a finite distance. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2024, vol. 38 (4), pp. 411–427.
12. Corici M.-I., Eichhorn F., Gowtham V., Magedanz T., Modroiu E.-R., Schreiner F. How organic networking meets 6G campus network management challenges. *2023 26th Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks and Workshops (ICIN)*. IEEE, 2023, pp. 169–173.
13. Tang X., Cao C., Wang Y., Zhang S., Liu Y., Li M., He T. Computing power network: The architecture of convergence of computing and networking towards 6G requirement. *China Communications*, 2021, vol. 18 (2), pp. 175–185.
14. Zong J., Liu Y., Liu H., Wang Q., Chen P. 6G cell-free network architecture. *2022 IEEE 2nd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI)*. IEEE, 2022, pp. 421–425.
15. Corici M., Troudt E., Magedanz T., Schotten H. Organic 6G networks: decomplexification of software-based core networks. *2022 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*. IEEE, 2022, pp. 541–546.
16. Cui H., Zhang J., Geng Y., Xiao Z., Sun T., Zhang N., Liu J., Wu Q., Cao X. Space-air-ground integrated network (SAGIN) for 6G: requirements, architecture and challenges. *China Communications*, 2022, vol. 19 (2), pp. 90–108.
17. Hu Z., Zhang P., Zhang C., Zhuang B., Zhang J., Lin S., Sun T. Intelligent decision making framework for 6G network. *China Communications*, 2022, vol. 19 (3), pp. 16–35.
18. Inomata M., Yamada W., Kuno N., Sasaki M., Kitao K., Nakamura M., Ishikawa H., Oda Y. Scattering effect up to 100 GHz band for 6G. *2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*. IEEE, 2021, pp. 749–750.
19. Ziegler V., Yrjölä S. How to make 6G a general purpose technology: prerequisites and value creation paradigm shift. *2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*. IEEE, 2021, pp. 586–591.
20. Hansen R.C. *Phased array antennas*. Hoboken, Wiley, 2009. 547 p.
21. Keller J.B. Geometrical theory of diffraction. *Journal of the Optical Society of America*, 1962, vol. 52 (2), pp. 116.
22. Mauch S. *Introduction to methods of applied mathematics or advanced mathematical methods for scientists and engineers*. California Institute of Technology, 2004.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Юзвик Денис Андреевич – родился в 1994 году, аспирант кафедры РПИПУ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: моделирование антенных решеток, СВЧ-устройств, электромагнитных полей. Опубликовано 18 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: zetanicestar@gmail.com).

Iuzvik Denis Andreevich (b. 1994) – postgraduate student of the department of Radio receiving and Radio transmitting devices at the Novosibirsk State Technical University. Research interests: modeling of antenna arrays, microwave devices, electromagnetic fields. Published 18 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: zetanicestar@gmail.com).



Степанов Максим Андреевич – д-р техн. наук, заведующий кафедрой РПиРПУ в Новосибирском государственном техническом университете. Область научных интересов: радиотехника. Опубликовано более 80 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: m.stepanov@corp.nstu.ru).

Stepanov Maksim Andreevich – Doctor of Sciences (Eng.), Head of the Department of Radio receiving and Radio transmitting devices at the Novosibirsk State Technical University. Research interests: radio engineering. More than 80 scientific papers have been published. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: m.stepanov@corp.nstu.ru).

*Статья поступила 22 января 2025 г.
Received January 22, 2025*

To Reference:

Iuzvik D.A., Stepanov M.A. Formirovanie puchnosti elektromagnitnogo polya s ispol'zovaniem dvukh lineinykh antennykh reshetok, raspolzhenykh ortogonal'no drug drugu [Formation of an antinode of an electromagnetic field using two linear antenna arrays located orthogonally to each other]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2025, no. 1 (66), pp. 51–70. DOI: 10.17212/1727-2769-2025-1-51-70.