

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.8.5>

УДК: 621.396.67

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ МАКСИМУМА НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ТРЕБУЕМОЙ ТОЧКЕ ПРОСТРАНСТВА ПРИ ПОМОЩИ СФОКУСИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Д.А. Юзвик, М.А. Степанов

Новосибирский государственный технический университет
630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

Статья поступила в редакцию 7 мая 2024 г.

Аннотация. В статье описывается способ формирования максимума напряженности электрического поля в требуемой точке. Для этого предлагается использовать сфокусированную антенную решетку. Известно, что максимум напряженности поля всегда смещен в сторону антенной решетки из-за эффекта снижения интенсивности. Было предложено два способа. Первый способ – это алгоритм итерационного увеличения фокусного расстояния, при котором максимум позиционируется в требуемой точке пространства. Второй способ заключается в использовании двух параллельных антенных решеток, которые сфокусированы в одну точку пространства. Рассмотрены особенности применения каждого из способов. Приведены примеры использования предложенных способов.

Ключевые слова: фокусировка, позиционирование максимума поля, антенные решетки, математическое моделирование.

Автор для переписки: Юзвик Денис Андреевич, zetanicestar@gmail.com

Введение

Формирование максимума амплитуды напряженности электрического поля для беспроводных сетей является эффективным способом снижения уровня взаимных помех между беспроводными устройствами. Снижение уровня взаимных помех приведет к увеличению скорости передачи данных [1, 2].

Формирование максимума амплитуды напряженности электрического поля с помощью антенных решеток (АР) является перспективной задачей [1, 2]. Ранние исследования показывают, что точка максимальной амплитуды напряженности электрического поля и точка синфазного сложения электромагнитных волн, как правило, не совпадают [1, 2, 8, 9]. Множество научных работ рассматривают увеличение амплитуды напряженности электрического поля как положительный результат [3-7], тогда как вопросы точности позиционирования максимума амплитуды напряженности электрического поля и размера зоны повышенной напряженности в окрестности максимума не рассматриваются.

В настоящее время разворачиваются сети 5G и разрабатывается технология 6G [10-12]. Большое количество абонентов может привести к снижению пропускной способности беспроводной сети. Для увеличения пропускной способности в таких сетях можно использовать пространственную селекцию устройств путем обеспечения максимума амплитуды напряженности электрического поля в необходимых участках пространства.

Для реализации пространственной селекции абонентских устройств необходимо разработать методы формирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в необходимой точке пространства. И установить факторы, влияющие на размеры зоны повышенной напряженности электрического поля в ее окрестностях.

На основании вышеизложенного составлен обзор методов формирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке с помощью сфокусированных линейных антенных решеток. В классическом понимании решение задачи фокусировки антенной решетки приводит к

увеличению напряженности электрического поля в окрестности точки синфазного сложения волн [13].

Например, в [13] рассмотрен метод оптимального проектирования сфокусированных антенных решеток. Предложен алгоритм расчета амплитуд и фаз сигналов, поступающих на парциальные излучатели антенной решетки. В [13] границы зоны фокусировки определяются уровнем -3 дБ относительно точки с максимальной интенсивностью.

Таким образом, возникает следующая ситуация. Перспективным направлением селекции абонентов беспроводных сетей передачи данных является формирование вблизи них зон повышенной напряженности электрического поля. Очевидный способ решить эту проблему – сфокусировать излучение в заданную точку. Исследования показывают, что положение точки синфазного сложения излучаемых волн не совпадает с максимумом зоны высокого напряжения. Однако количественные оценки для различных соотношений размера антенны и фокусного расстояния этого смещения отсутствуют.

Увеличение амплитуды напряженности электрического поля в районе точки синфазного сложения электромагнитных волн происходит за счет интерференции электромагнитных волн.

Традиционно формирование максимума амплитуды напряженности электрического поля решается через задачу фокусировки антенной решетки – обеспечения синфазного сложения электромагнитных волн в заданной точке пространства.

В [1, 8, 9] установлено, что максимум амплитуды напряженности электрического поля всегда смещена от точки синфазного сложения в сторону антенной решетки.

В связи с этим точка синфазного сложения волн и точка с максимальной амплитудой напряженности электрического поля являются двумя разными точками в пространстве. Следовательно, необходимо разделить задачи фокусировки антенной решетки и формирования максимума амплитуды

напряженности электрического поля в данной точке пространства. В то же время для линейных антенных решеток не существует методов, обеспечивающих позиционирование максимальной напряженности электрического поля в заданной точке пространства.

Это определяет цель данной работы – предложить методы, обеспечивающие для линейных антенных решеток позиционирование максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства.

1. Теоретические положения

На основе предыдущего подраздела приведем схематическое изображение факторов, влияющих на смещение максимума амплитуды напряженности электрического поля.

На рисунке 1 схематично показано влияние явления снижения интенсивности на смещение максимума амплитуды напряженности электрического поля в сторону антенной решетки. На рисунках использованы следующие обозначения: ΔR – величина смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля относительно точки фокусировки; F – фокусное расстояние; L – линейные размеры антенной решетки; ΔD_c – размер зоны повышенной напряженности от точки максимума в сторону антенной решетки по уровню -3 дБ; ΔD_b – размер зоны повышенной напряженности от точки максимума в сторону от антенной решетки по уровню -3 дБ.

На рисунке 1 показано, что при взаимодействии двух факторов $E(r)$ и $1/r$ они уравниваются друг друга до точки синфазного сложения волн.

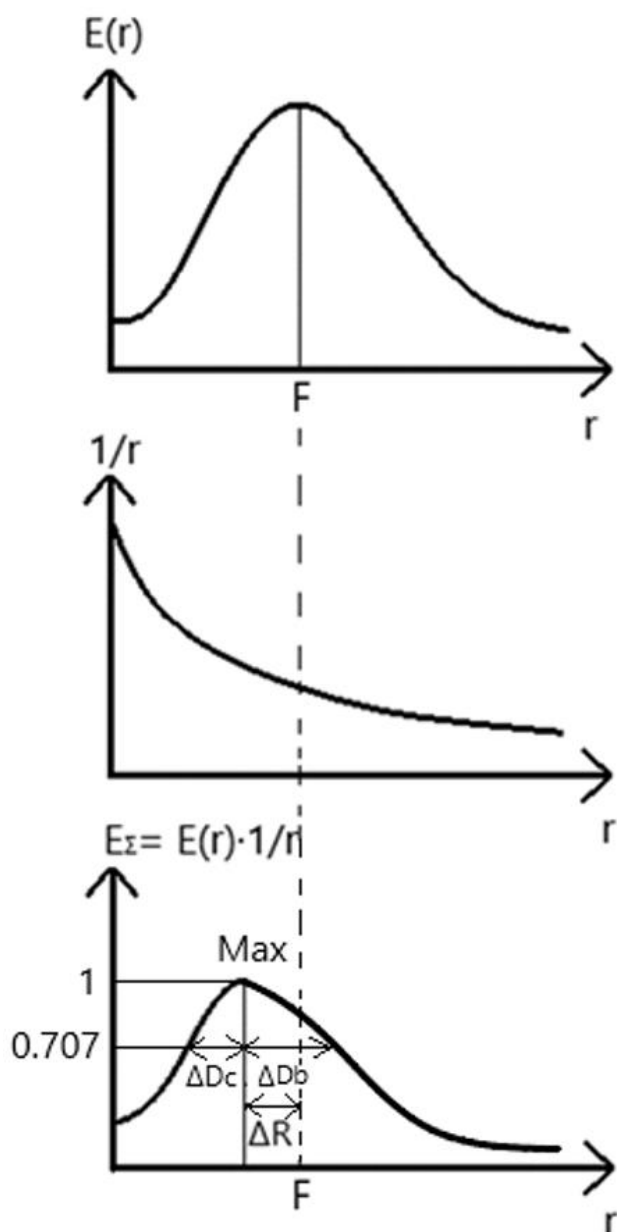


Рис. 1. О смещении максимума напряженности электрического поля [1].

Для расчета зависимости амплитуды напряженности электрического поля вдоль фокальной оси в данной работе использовались следующие соотношения:

С помощью выражения (1) рассчитывается расстояние между каждым излучателем антенной решетки и точкой, расположенной на фокальной оси.

$$r_{n,p} = \sqrt{(x_n - a_p)^2 + (y_n - b_p)^2 + (z_n - c_p)^2}, \quad (1)$$

На основе полученных расстояний рассчитываются начальные фазы сигналов по выражению (2) [1, 7].

$$\phi_n = r_n \cdot \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (2)$$

где λ – длина волны; r_n – расстояние от n -го излучателя до точки фокусировки.

С помощью выражения (3) рассчитывается коэффициент передачи для всех точек, лежащих на фокальной оси [2].

$$K_{n,p} = g_{n,p}(\alpha, \theta) \cdot r_{n,p}^{-q} \cdot \exp(-j \cdot \beta \cdot r_{n,p}), \quad (3)$$

где $g_{n,p}(\alpha, \theta)$ – усиление по полю парциального излучателя по направлению к точке, лежащей на фокальной оси (α – азимут, θ – угол места), $r_{n,p}$ – расстояние между парциальным излучателем и p -той точкой на фокальной оси, β – коэффициент фазы, q – указывает, по какому закону интенсивность электромагнитной волны убывает с увеличением расстояния ($q = 1$ для дальней зоны, $q = 2$ для ближней зоны).

Учитывая, что антенная решетка возбуждается сигналами одинаковой амплитуды, запишем выражение, позволяющее рассчитать амплитуду напряженности электрического поля вдоль фокальной оси [1,2,7-9]:

$$E_{\Sigma p} = \sum_{n=1}^N A_n \cdot K_{n,p}, \quad (4)$$

где A_n – комплексное значение амплитуды сигнала в точке излучения.

Все результаты, представленные в работе, получены на основе данного математического аппарата.

2. Аналитические выражения для расчета смещения максимума напряженности электрического поля, относительно точки фокусировки

В работе [1] приведены зависимости величины смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля относительно точки синфазного сложения от линейных размеров антенной решетки (см. рисунок 2).

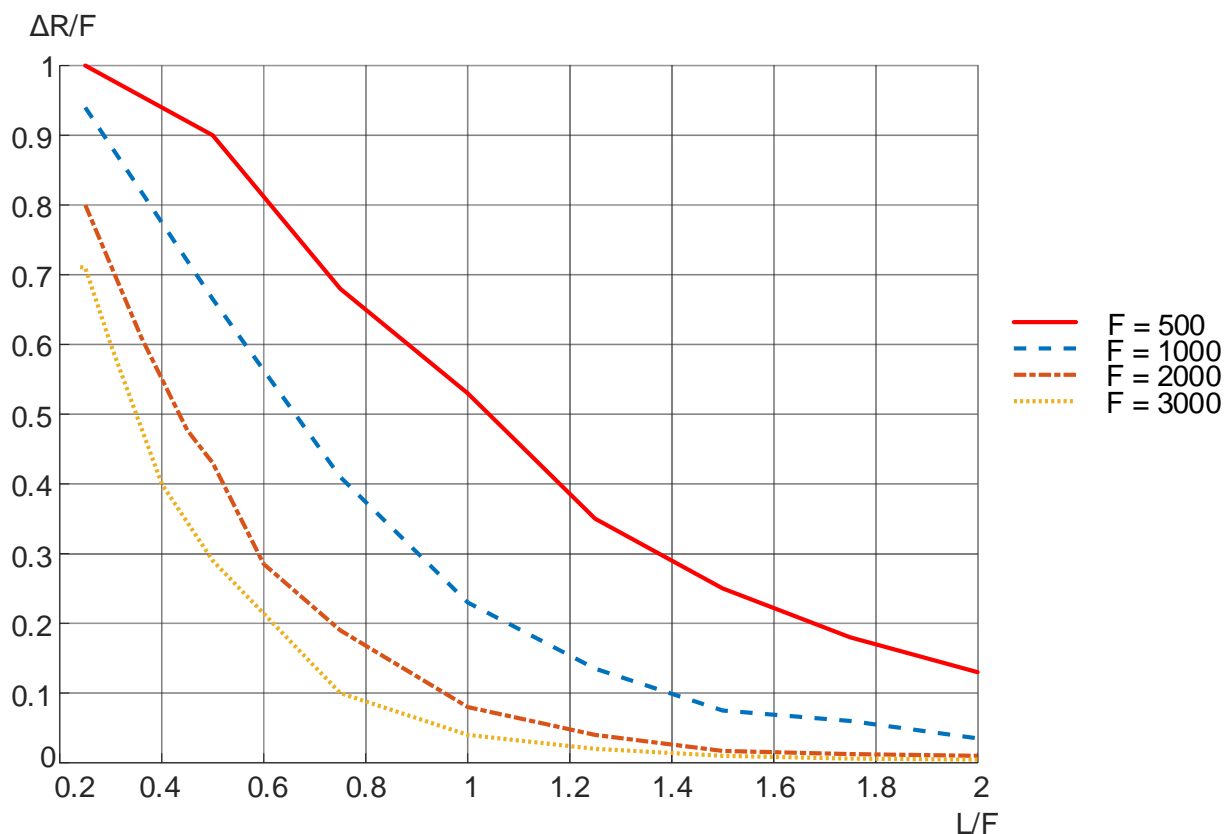


Рис. 2. Зависимость величины смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля [1].

Выполним аппроксимацию зависимостей, представленных на рисунке 2. Для этого рассмотрим семейство зависимостей, определяющих величину нормированного к фокусному расстоянию смещения максимума напряженности электрического поля от точки синфазного сложения ($\Delta R/F$) как функцию двух переменных: линейного размера антенной решетки (L/F) и расстояния от антенной решетки до точки ее фокусировки (F).

Аппроксимация выполнена с использованием степенного полинома двух переменных относительно F и L/F . Коэффициенты полинома определены методом наименьших квадратов и приведены в таблице 1.

Ограничимся степенным полиномом третьей степени [14].

$$\frac{\Delta R}{F}(x, z) = a_1 x^3 + a_2 x^2 z + a_3 x^2 + a_4 x z^2 + a_5 x z + a_6 x + a_7 z^3 + a_8 z^2 + a_9 z + a_{10}, \quad (5)$$

где $x = L/F$ – переменная, определяющая отношение линейного размера антенной решетки к фокусному расстоянию; a_i – коэффициенты аппроксимирующего полинома, $z = F$ – переменная, определяющая фокусное расстояние.

Таблица 1. Коэффициенты аппроксимирующего полинома.

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

Помимо величины смещения максимума относительно точки фокусировки, оценим размеры области, в пределах которой формируется высокая напряженность электрического поля. Обозначим расстояние от точки максимума до точки с уровнем -3 дБ относительно максимума, в сторону антенной решетки как ΔD_c (close distance), а величину расстояния от точки максимума до уровня -3 дБ относительно максимума, в противоположную от антенной решетки сторону как ΔD_b (beyond distance) (рисунок 1). Семейства зависимостей для ΔD_c и ΔD_b от размера антенной решетки, нормированного к фокусному расстоянию, показаны на рисунках 3 и 4 соответственно.

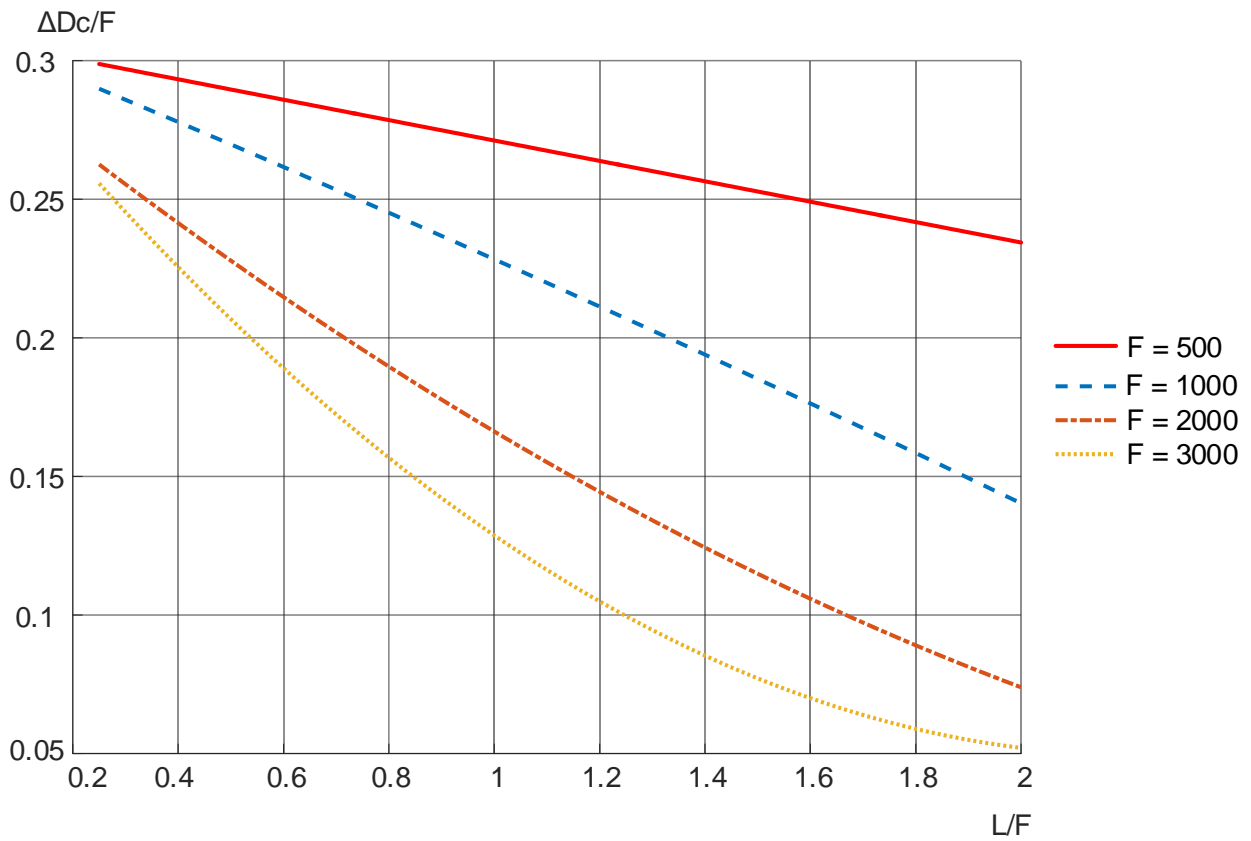


Рис. 3. Зависимость расстояний ΔD_c для различных отношений L / F .

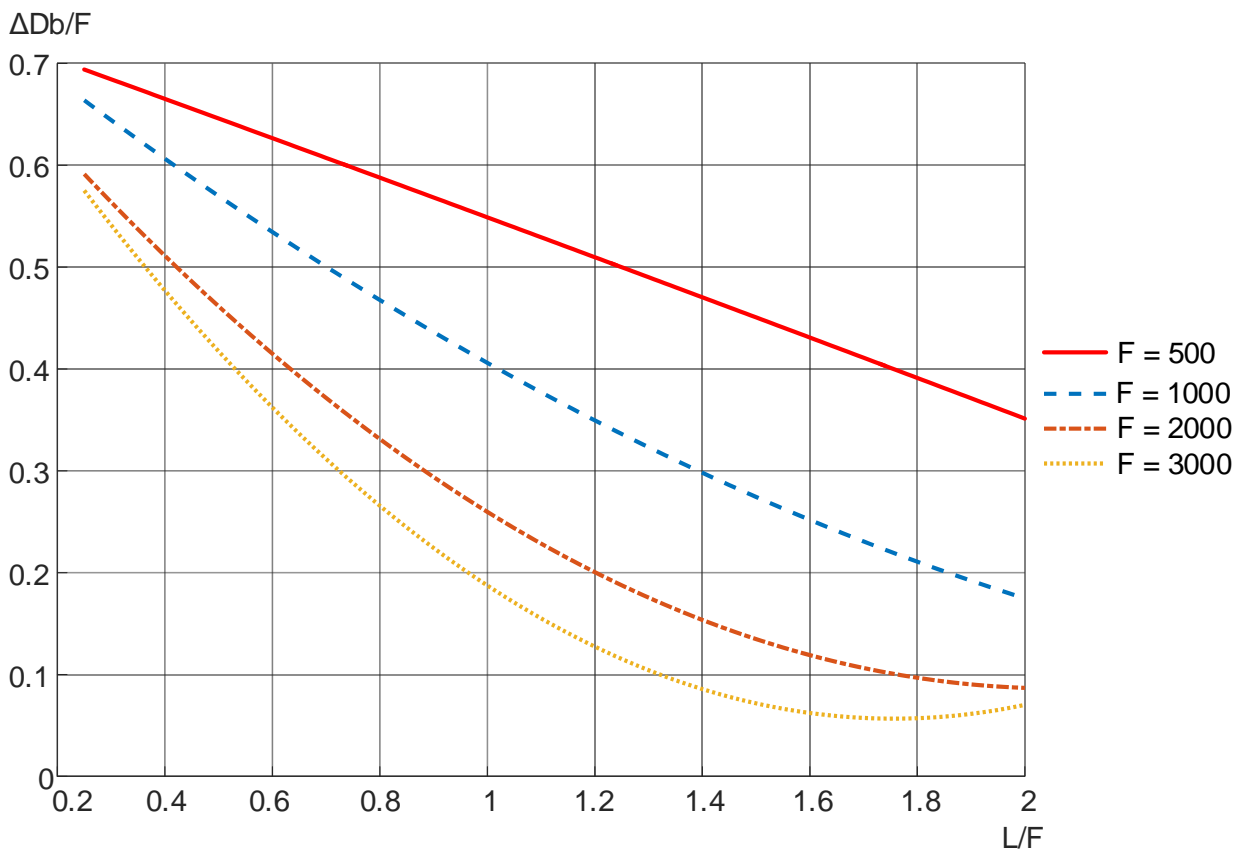


Рис. 4. Зависимость расстояний ΔD_b для различных отношений L / F .

По аналогии с величиной смещения максимума напряженности электрического поля от точки синфазного сложения проведем аппроксимацию зависимостей ΔD_c и ΔD_b с помощью двумерного полинома третьей степени (5). Обозначения для переменных x и z остаются неизменными. Коэффициенты аппроксимирующих полиномов для расчета $\Delta D_c / F$ и $\Delta D_b / F$ приведены в таблицах 2 и 3 соответственно.

Таблица 2. Коэффициенты аппроксимирующего полинома ΔD_c .

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
-0.034667	$3.3685 \cdot 10^{-5}$	0.13226	$2.5668 \cdot 10^{-8}$	-0.00020194
a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
-0.15487	$-1.1267 \cdot 10^{-11}$	$4.6397 \cdot 10^{-8}$	$-2.112 \cdot 10^{-5}$	0.40969

Таблица 3. Коэффициенты аппроксимирующего полинома ΔD_b .

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
0.019333	$7.4344 \cdot 10^{-5}$	-0.13552	$4.1628 \cdot 10^{-8}$	-0.00033989
a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
0.14646	$-3.008 \cdot 10^{-11}$	$1.5884 \cdot 10^{-7}$	0.00025321	0.70614

Таким образом, получили выражения, позволяющие при заданных геометрических размерах антенной решетки и координатах точки фокусировки ее излучения, рассчитать величину смещения максимума напряженности электрического поля относительно этой точки и размер области, в пределах которой наблюдается высокая напряженность электрического поля. Очевидным следующим шагом является рассмотрение способов, позволяющих сформировать максимум напряженности электрического поля в точке с заданными координатами.

3. Алгоритм компенсации смещения точки максимума напряженности электрического поля от точки фокусировки

Для позиционирования максимума напряженности электрического поля в заданной точке сфокусируем антенную решетку на более дальнее расстояние. 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. Важно помнить, что, согласно зависимостям, приведенных на рисунках 3 и 4, при этом размер области в окрестностях максимума напряженности электрического поля по уровню -3 дБ будет увеличиваться в след за увеличением фокусного расстояния.

Итерационный алгоритм, обеспечивающий положение максимума напряженности электрического поля в заданной точке пространства содержит следующие шаги.

Задать геометрический размер антенны, координаты точки, в которой требуется сформировать максимум напряженности электрического поля и допустимую погрешность по координатам формирования максимума амплитуды напряженности.

Для заданного размера антенны и координат точки максимума напряженности электрического поля по выражению (5) рассчитать величину смещения максимума напряженности электрического поля от точки фокусировки (ΔR).

Увеличить фокусное расстояние антенной решетки на полученное значение смещения $F_i = F_{i-1} + \Delta R$, где ΔR – смещение максимума напряженности электрического поля относительно точки его требуемого положения, F_i – фокусное расстояние на i -том шаге; F_{i-1} – фокусное расстояние на предыдущем шаге алгоритма.

Повторять действия по пунктам 2 – 4 до тех пор, пока величина смещения координаты максимума напряженности электрического поля от требуемой точки максимума напряженности электрического поля превышает целевое значение. Рассмотрим пример реализации алгоритма компенсации смещения точки максимума напряженности электрического поля от точки фокусировки. Пусть требуется с помощью антенной решетки с параметрами $N = 20$ расстоянием между излучателями 60 мм ($d/\lambda = 0.5$) обеспечить максимум напряженности электрического поля на расстоянии $F = 1000$ мм от антенной решетки. Длина волны составляет $\lambda = 120$ мм. Целевое значение погрешности смещения максимума напряженности электрического поля 2%. Выполняя операции по предложенному итерационному алгоритму установить максимум амплитуды напряженности электрического поля для заданных исходных данных, удалось, задав фокусное расстояние $F = 1210$ мм. На рисунке 5 продемонстрированы три зависимости амплитуды напряженности электрического поля от дальности, полученные на разных шагах итерационного алгоритма.

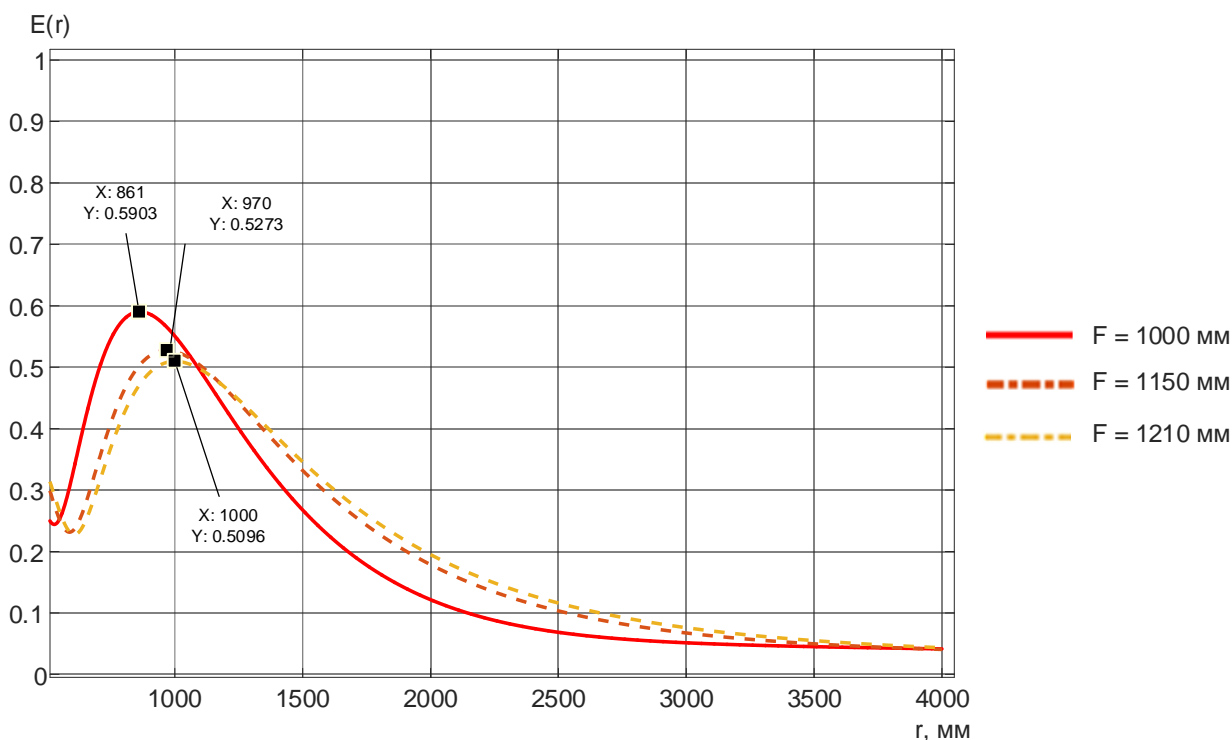


Рис. 5. Зависимости амплитуды напряженности электрического поля от дальности, полученные на разных шагах итерационного алгоритма.

На рисунке 5 заметно, что увеличение фокусного расстояния приводит к расширению области повышенной напряженности электрического поля. Размер области в окрестности максимума амплитуды напряженности электрического поля по уровню -3 дБ для фокусного расстояния $F = 1000$ мм составляет $\Delta D_c = 210$ мм и $\Delta D_b = 361$ мм, а для фокусного расстояния $F = 1210$ мм $\Delta D_c = 254$ мм и $\Delta D_b = 476$ мм. Область в окрестности максимума амплитуды напряженности электрического поля по уровню -3 дБ расширилась на 159 мм. Основные характеристики области окрестности максимума на всех шагах выполнения алгоритма представлены в таблице 4.

Таблица 4. Основные характеристики области окрестности максимума амплитуды напряженности электрического поля.

F , мм	ΔR , мм	$\Delta R / \lambda$	D_c , мм	D_b , мм	$\Delta D = \Delta D_c + \Delta D_b$, мм
1000	130	1.08	210	361	571
1150	30	0.25	249	433	682
1210	0	0	254	476	730

Для более наглядной демонстрации расширения области в окрестностях максимума амплитуды напряженности электрического поля при росте фокусного расстояния, рассмотрим еще один случай формирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства. Параметры антенны относительно прошлого эксперимента остались без изменений. Расстояние, от антенны до точки, где должна обеспечиваться максимальная напряженность электрического поля, составляет 2000 мм. Отношение $L / F = 0.6$. Целевое значение погрешности установления координаты максимума амплитуды напряженности 2%. Для позиционирования максимума напряженности электрического поля в заданную точку потребовалось пять итераций. На рисунке 6 представлены зависимости, полученные на разных шагах итерационного алгоритма.

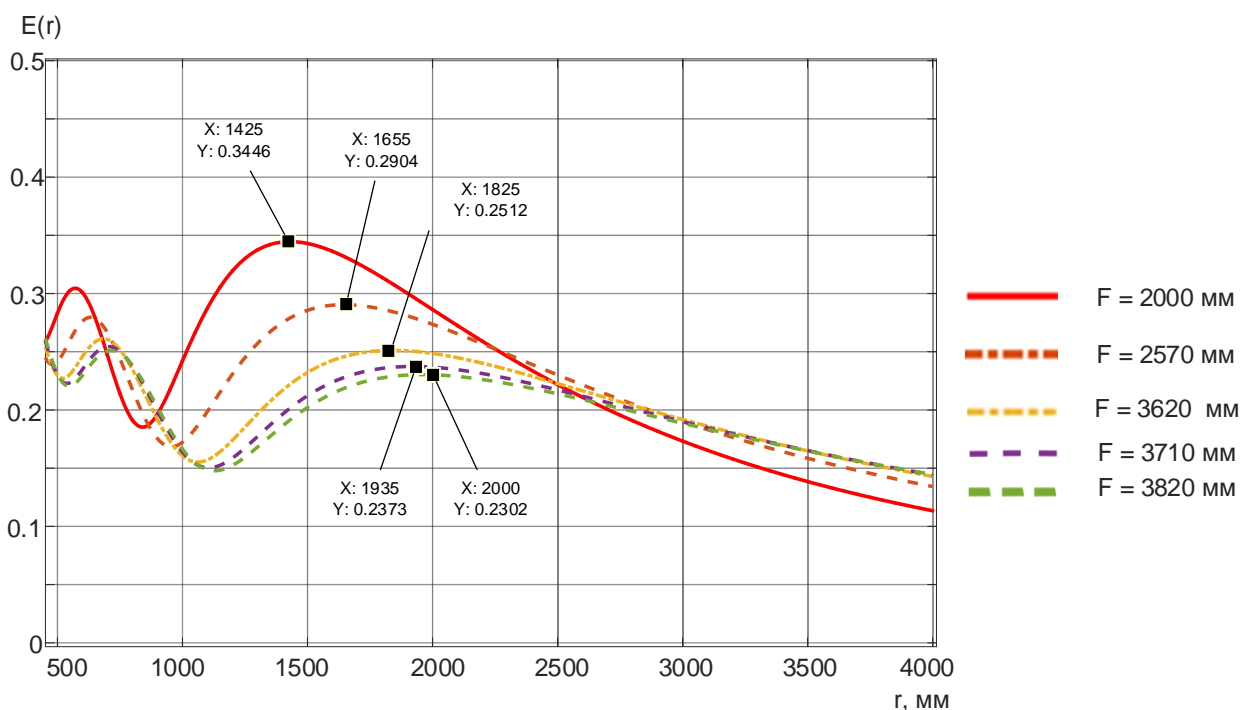


Рис. 6. Зависимости амплитуды напряженности электрического поля от дальности, полученные на разных шагах итерационного алгоритма.

По зависимостям показанным на рисунке 6, можно видеть, что обеспечить максимум в заданной точке удалось только при $F = 3820$ мм. Амплитуда напряженности электрического поля в сравнении с между точками максимума в координатах $X = 1425$ и $X = 2000$ снизилась на 3.5 дБ. Размер области в окрестности максимума для фокусного расстояния $F = 2000$ мм по уровню -3 дБ составляет $\Delta D_c = 422$ мм и $\Delta D_b = 893$ мм, а для фокусного расстояния $F = 3820$ мм $\Delta D_c = 731$ мм и $\Delta D_b = 1544$ мм. Размер области повышенной напряженности электрического поля по уровню -3 дБ вырос на 960 мм, то есть почти в два раза относительно размера на первом шаге. Результаты расчетов сведены в таблицу 5.

Таблица 5. Сравнение размеров области максимума амплитуды напряженности электрического поля.

F , мм	ΔR , мм	$\Delta R / \lambda$	D_c , мм	D_b , мм	$\Delta D = \Delta D_c + \Delta D_b$, мм
2000	575	4.791	422	893	1315
2570	345	2.875	535	1141	1676
3620	175	1.458	576	1450	2026
3710	65	0.541	675	1500	2175
3820	0	0	731	1544	2275

Выводы:

- 1) Формирование максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданных координатах пространства возможно за счет фокусировки антенной решетки в более дальней точке. Координаты этой точки могут быть определены предложенным итерационным алгоритмом.
- 2) Фокусировка антенной решетки на более дальнее расстояние приводит к снижению напряженности электрического поля в требуемой точке и расширению области повышенной напряженности электрического поля в окрестностях этой точки. Эти два эффекта выражены тем сильнее, чем большую величину смещения точки максимальной амплитуды напряженности электрического поля от требуемого местоположения необходимо компенсировать.

4. Использование двух параллельных одномерных антенных решеток, для обеспечения максимума напряженности электрического поля в заданной точке пространства

Формирование максимума амплитуды напряженности электрического поля с использованием одной одномерной антенной решетки приводит к тому, что происходит смещение максимума напряженности электрического поля в сторону антенной решетки. При компенсации этого смещения за счет фокусировки антенной решетки в более дальней точке происходит снижение напряженности электрического поля в требуемой точке и расширение области повышенной напряженности электрического поля в окрестностях этой точки. Для компенсации этих недостатков рассмотрим случай использования двух одномерных решеток для обеспечения максимума напряженности электрического поля в заданной точке пространства.

На рисунке 7 представлена конфигурация двух одинаковых антенных решеток, расположенных друг напротив друга и сфокусированных в одну точку, равноудаленную от каждой из антенных решеток.

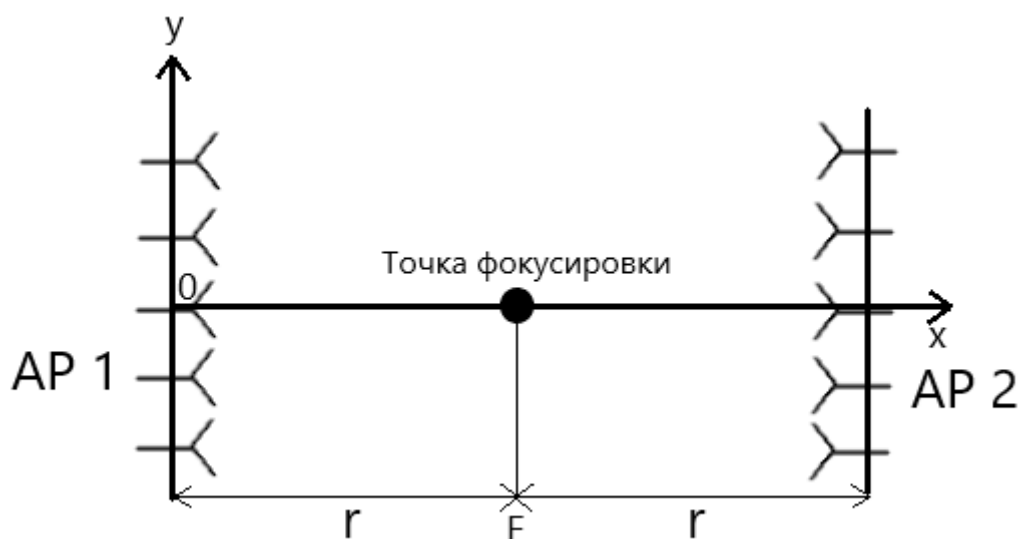


Рис. 7. Конфигурация двух антенных решеток, расположенных друг напротив друга, сфокусированных в одну точку.

Спадающее по интенсивности излучение от обеих антенных решеток (рис. 1) можно рассмотреть, как два независимых фактора. Обозначим зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния до первой и второй антенных решеток как $E_1(r)$ и $E_2(r)$ соответственно. Каждая антенная решетка сформирует максимум амплитуды напряженности электрического поля, который будет смещен относительно точки синфазного сложения электромагнитных волн ΔR в сторону соответствующей антенной решетки. Эту величину можно рассчитать, пользуясь степенным полиномом (5) и коэффициентами, приведенными в таблице 1. Как говорилось ранее, в окрестностях точки максимума напряженности электрического поля формируется область повышенной напряженности электрического поля. От каждой антенной решетки эти области будут пересекаться в точке, имеющей некоторый уровень напряженности электрического поля, определяемый расстоянием до точки фокусировки и размерами антенной решетки. Возможно три случая: области пересекутся по уровню ниже -3 дБ от максимума; области пересекутся по уровню -3дБ от максимума; области пересекутся по уровню выше -3 дБ от максимума. Рассмотрим эти случаи подробнее.

В случае, если области повышенной напряженности электрического поля пересекутся в точке с напряженностью менее -3дБ относительно точек

максимума напряженности электрического поля, то в месте пересечения будет «провал» по суммарной напряженности электрического поля (рис. 8, кривая а). В этом случае будет наблюдаться два максимума напряженности электрического поля равноотстоящих от требуемой точки. Расстояние от требуемой точки до этих максимумов можно рассчитать по выражению (5) с использованием коэффициентов из таблицы 1.

Если области повышенной напряженности электрического поля пересекутся по уровню -3 дБ, то в месте пересечения будет «плато» по уровню напряженности электрического поля, совпадающее с точками максимума напряженности электрического поля (рисунок 8, кривая б). Размер «плато» зависит от размеров D_{b1} и D_{b2} – размеров области повышенной напряженности электрического поля по уровню -3 дБ в сторону от формирующей антенной решетки. При этом должно выполняться условие $\Delta D_{b1} = D_{b2} = \Delta R$, т.е. размер области повышенной напряженности должен быть равен смещению максимума амплитуды напряженности относительно точки синфазного сложения волн. Общий размер «плато» по уровню -3 дБ от максимального значения определяется выражением:

$$\Delta D_{\Sigma} = \Delta D_{c1} + \Delta D_{b1} + \Delta D_{b2} + \Delta D_{c2}. \quad (6)$$

В случае, если области повышенной напряженности электрического поля пересекутся по уровню более -3 дБ, образуется максимум, по уровню превышающий точки максимума амплитуды напряженности электрического поля от каждой антенной решетки в отдельности (рисунок 8, кривая в).

При этом, очевидно, должно выполняться условие $\Delta D_b > \Delta R$, т.е. размер области повышенной напряженности должен быть больше смещения максимума амплитуды напряженности относительно точки синфазного сложения волн.

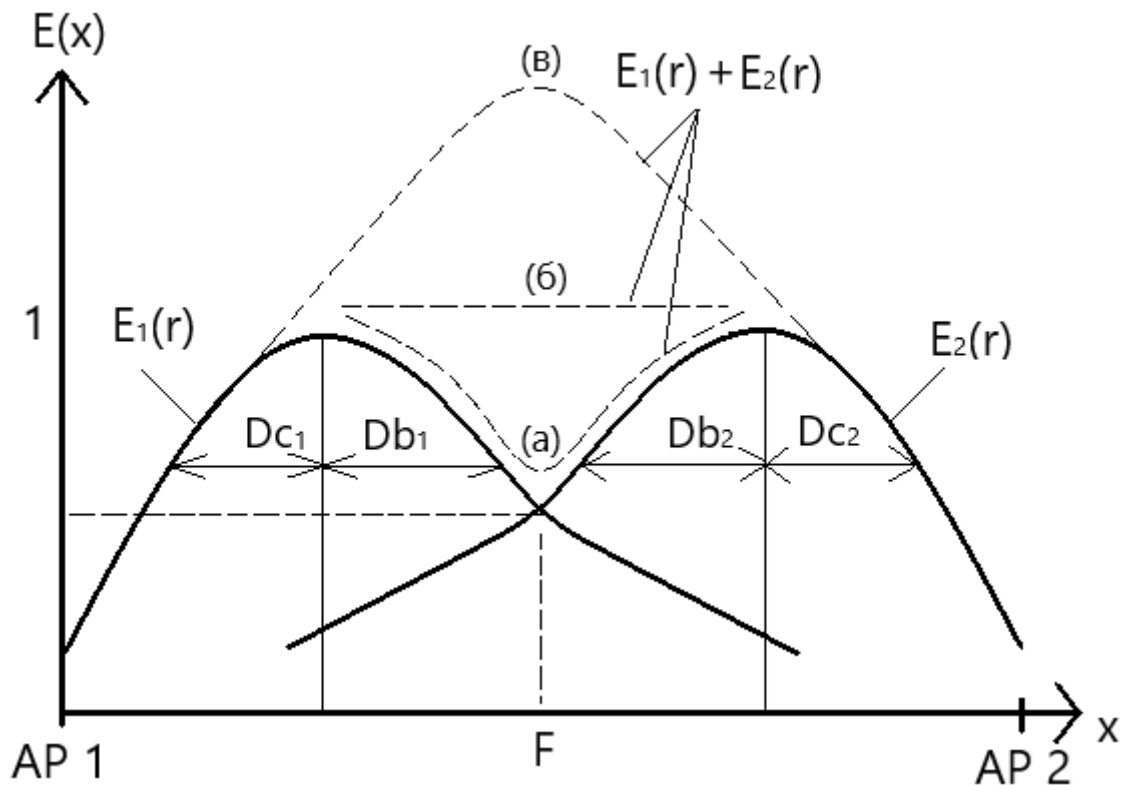


Рис. 8. Схематичное представление зависимости амплитуды напряженности электрического поля, для двух параллельных антенных решеток, равноудаленных от точки фокусировки.

Подтвердим выдвинутые предположения математическим моделированием. Для этого рассмотрим антенные решетки, соответствующие трем ранее описанным случаям.

Проведем расчет зависимости амплитуды напряженности электрического поля от расстояния, для двух антенных решеток, расположенных напротив друг друга на расстоянии 4000 мм и сфокусированных на 2000 мм. Рассмотрим пары, сформированные четырьмя антенными решетками различных размеров:

- 1) $N = 12, d = \lambda/2;$
- 2) $N = 15, d = \lambda/2;$
- 3) $N = 20, d = \lambda/2;$
- 4) $N = 30, d = \lambda/2.$

Амплитуды сигналов для всех излучающих элементов обеих антенных решеток равны между собой. Длина волны составляет $\lambda = 120$ мм. Для каждой из решеток фазы излучаемых сигналов определялись по соотношению (2). Смещение точки максимума напряженности электрического поля от точки

фокусировки и размер области высокой напряженности электрического поля для всех рассматриваемых антенных решеток приведены в таблице 6. Из таблицы 6 видно следующее. Антенные решетки 1 и 2 соответствуют случаю пересечения напряженностей электрического поля по уровню ниже -3 дБ от максимума. Использование антенных решеток 3 обеспечивает пересечение напряженностей электрического поля по уровню примерно -3 дБ от максимума и должно приводить к образованию «плато» протяженностью порядка 2200 мм. Максимум напряженности электрического поля при этом будет формироваться в требуемой точке. Для антенной решетки 4 происходит сложение напряженностей электрического поля, формируемых каждой из антенных решеток, по уровню выше -3 дБ. При этом максимум напряженности электрического поля будет установлен точно в требуемой координате, в окрестности которой будет сформирована область высокой напряженности электрического поля размером 1156 мм. Результаты расчетов показаны на рисунке 9.

Таблица 6. Характеристики используемых антенных решеток.

№	N	L , м	D_c , мм	D_b , мм	ΔR , мм	$\Delta R / \lambda$
1	12	0.72	646	930	1212.2	10.101
2	15	0.9	589.8	867.6	1003	8.358
3	20	1.2	507.2	766.6	709.8	5.915
4	30	1.8	377.8	578.2	303.8	2.531

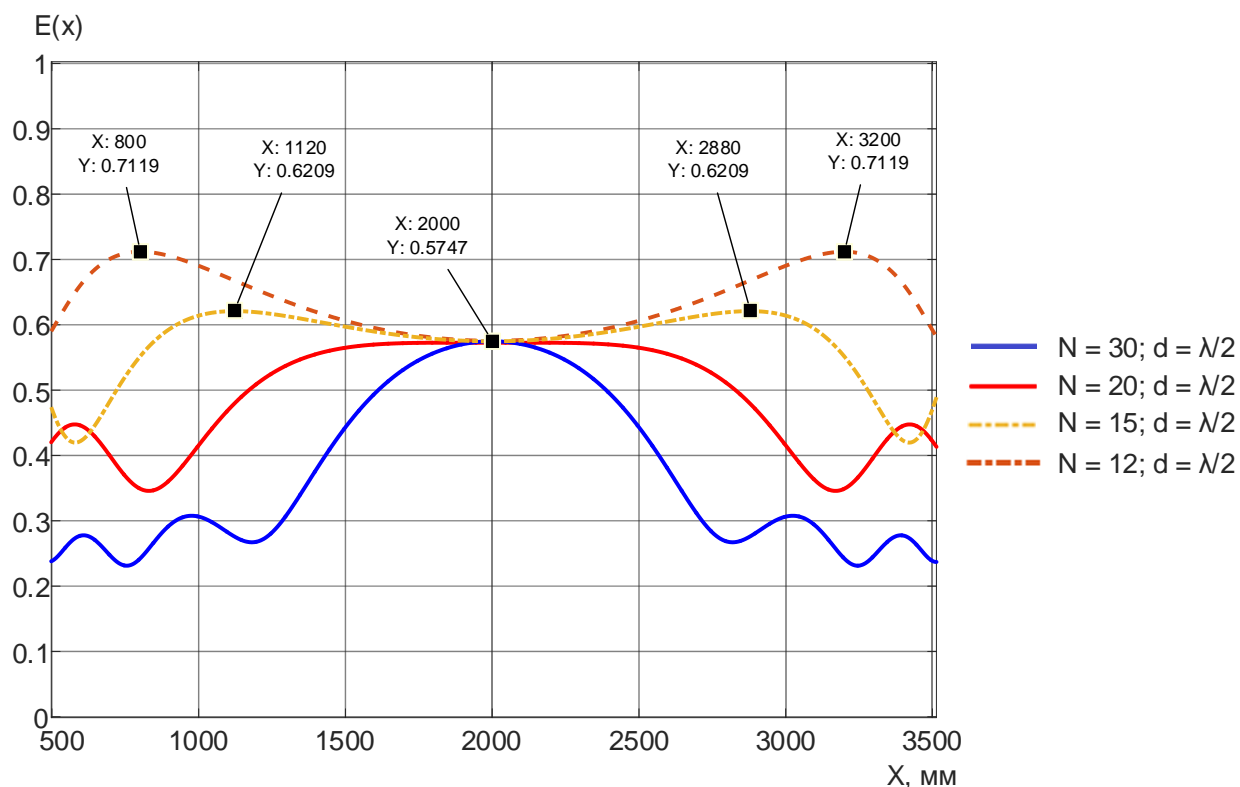


Рис. 9. Зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния, для двух антенных решеток, расположенных напротив друг друга

Анализируя результаты представленные в таблице 6, а также на рисунке 9 становится ясно, что на формирование единого максимума в заданной точке влияет только размер ΔD_b – размер области, по уровню -3 дБ, повышенной напряженности электрического поля в противоположную от антенной решетки сторону. Другими словами, размер ΔD_b – это размер области повышенной напряженности электрического поля от точки максимума напряженности электрического поля в направлении точки синфазного сложения электромагнитных волн. Таким образом при решении задачи формирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства размер ΔD_c – размер области, по уровню -3 дБ, повышенной напряженности электрического поля от точки максимума в сторону антенной решетки не влияет на формирование максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства. Отсутствие влияния размера ΔD_c на формирование максимума напряженности электрического поля объясняется тем, что эта область не участвует в пересечении с аналогичной областью у второй антенной решетки из-за своего расположения в сторону

антенной решетки. Следовательно, для решения поставленной задачи достаточно знать только параметр ΔD_b .

Вторым важным параметром в решении задачи обеспечения максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства является параметр смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля ΔR в сторону антенной решетки. На основании полученных данных для того, чтобы образовался «провал» по значениям амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства достаточно того, чтобы области повышенной напряженности электрического поля пересеклись в требуемой точке по уровню меньше, чем -3 дБ. Этому случаю удовлетворяет условие $\Delta D_b < \Delta R$, что подтверждается результатами для антенных решеток $N = 12$ и $N = 15$. Для того, чтобы образовалось «плато» в окрестностях точки пересечения, для этого достаточно того, чтобы области повышенной напряженности пересеклись по уровню -3 дБ. Для этого случая удовлетворяет условие $\Delta D_b = \Delta R$, что наблюдается для антенной решетки $N = 20$. Для того чтобы образовался один максимум амплитуды напряженности электрического поля, необходимо, чтобы области повышенной напряженности электрического поля пересекались по уровню большему, чем -3 дБ. Для этого случая удовлетворяет условие $\Delta D_b > \Delta R$, это наблюдается для антенной решетки $N = 30$.

Заключение

Для линейных антенных решеток, сфокусированных на конечное расстояние, получены соотношения, позволяющие рассчитать смещение максимума от точки синфазного сложения электромагнитных волн, излучаемых ее элементами и размер области высокой напряженности электрического поля, формируемого решеткой.

Предложен итерационный алгоритм, позволяющий установить максимум напряженности электрического поля в требуемую точку, благодаря фокусировке антенной решетки на большее расстояние. Показано, что фокусировка антенной решетки на дальнее расстояние приводит к снижению напряженности

электрического поля в требуемой точке и к расширению области повышенной напряженности электрического поля в окрестностях максимума амплитуды напряженности электрического поля.

Рассмотрена возможность формирования максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства при помощи двух параллельных антенных решеток, расположенных эквидистантно относительно требуемого местоположения точки максимума амплитуды напряженности. Определены условия, при которых рассматриваемая конфигурация линейных антенн, сфокусированных на конечное расстояние, формирует максимум напряженности электрического поля в заданной точке пространства.

Представленные результаты получены для диаграммы направленности изотропного элемента. В реальных антенных решетках используются элементы с широкой диаграммой направленности. Очевидно, диаграмма направленности элементов будет влиять на точность позиционирования максимальной напряженности электрического поля. Однако, ожидается, что влияние ширины главного лепестка диаграммы направленности на величину смещения будет небольшим.

Результаты подтверждены математическим моделированием.

Литература

1. 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. – С. 350-354.
2. Iuzvik D.A., Stepanov M.A. Focusing of the electromagnetic field in several given areas of space // Progress In Electromagnetics Research M. – 2022. – Т. 113. – С. 11-22.

3. Седельников Ю.Е. и др. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля // Основы теории и технические приложения / Под общей редакцией Ю.Е. Седельникова и Н.А. Тестоедова. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, Красноярск. – 2015.
4. Низамутдинов Р.Р. Исследование характеристик линейных сфокусированных антенн для радиоволновых технологических и диагностических устройств. – 2011.
5. Халикова К.Н. Антенны, сфокусированные в области ближнего излученного поля для задач микроволновых технологий : дис. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. КНИТУ-КАИ им. АН Туполева. Казань, 2017.
6. Chu H.L., Mishra G., Sharma S.K. Dual polarized wideband vivaldi 4x4 subarray antenna aperture for 5g massive MIMO panels with simultaneous multiple beams // 2018 18th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM). – IEEE, 2018. – С. 1-2.
7. Смирнов В.Ю., Никитин О.Р. Линейные фазированные антенные решетки, сфокусированные в ближней зоне // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2008. – №. 26. – С. 33-35.
8. Karimkashi S., Kishk A.A. Focusing properties of Fresnel zone plate lens antennas in the near-field region // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2011. – Т. 59. – №. 5. – С. 1481-1487.
9. Hansen R. Focal region characteristics of focused array antennas // IEEE transactions on antennas and propagation. – 1985. – Т. 33. – №. 12. – С. 1328-1337.
10. Brito J.M.C., Mendes L.L., Gontijo J.G.S. Brazil 6G project-an approach to build a national-wise framework for 6G networks // 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT). – IEEE, 2020. – С. 1-5.
11. Suyama S. et al. Recent studies on massive MIMO technologies for 5G evolution and 6G // 2022 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS). – IEEE, 2022. – С. 90-93.

12. Dzogovic B. et al. Thunderbolt-3 backbone for augmented 5G network slicing in cloud-radio access networks // 2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF). – IEEE, 2019. – С. 415-420.
13. Shan L., Geyi W. Optimal design of focused antenna arrays // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2014. – Т. 62. – №. 11. – С. 5565-5571.
14. Phillips G.M. Interpolation and approximation by polynomials. – Springer Science & Business Media, 2003. – Т. 14.

Для цитирования:

Юзвик Д.А., Степанов М.А. Позиционирование максимума напряженности электрического поля в требуемой точке пространства при помощи сфокусированной антенной решетки. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.8.5>