

УДК 621.396.67

**ФОРМИРОВАНИЕ МАКСИМУМА НАПРЯЖЕННОСТИ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ЗАДАННОЙ ТОЧКЕ ПРОСТРАНСТВА  
С ФОКУСИРОВАННОЙ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ****Д.А. Юзвик, М.А. Степанов***Новосибирский государственный технический университет*

Рассмотрена возможность формирования максимума напряженности электрического поля в заданной точке пространства с помощью сфокусированной одномерной линейной антенной решетки. Показано, что местоположение максимума напряженности электрического поля не совпадает с точкой синфазного сложения электромагнитных волн, излученных элементами антенной решетки – точкой фокусировки. Представлена зависимость величины смещения максимума напряженности электрического поля от точки фокуса для различных фокусных расстояний и размеров антенных решеток. Установлено, что величина смещения по координатам фокусировки определяется только размером антенной решетки и не зависит от количества ее элементов. Описана связь между снижением интенсивности электромагнитной волны и смещением максимума амплитуды напряженности электрического поля. В работе представлены зависимости амплитуды напряженности электрического поля для антенных решеток различных линейных размеров, результаты расчетов подтвердили теоретические представления. Представлен фазовый портрет для антенных решеток различных размеров, показывающий синфазный приход волн в заданную точку пространства. Согласно семейству зависимостей, представленных в работе, можно сделать вывод, что чем больше отношение линейных размеров антенной решетки к фокусному расстоянию, тем меньше величина смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля.

*Ключевые слова:* антенные решетки, фокусировка линейных антенных решеток, обеспечение максимума амплитуды напряженности электрического поля.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-3-67-79

**Введение**

Формирование максимума амплитуды напряженности электрического поля для излучения сетей беспроводной передачи данных является перспективным способом пространственной селекции устройств-абонентов. Целью пространственной селекции является снижение уровня взаимных помех между устройствами-абонентами беспроводных телекоммуникационных сетей. Следствием этого является увеличение скорости передачи информации в такой сети.

На данный момент известны представления полной конфигурации антенной решетки (полная конфигурация – это конфигурация антенной решетки, состоящей из четырех линейных антенных решеток, которые расположены ортогонально относительно соседних) в виде отдельных линейных парциальных антенных решеток [1–3], что существенно упрощает их анализ, в частности хорошо известны способы управления диаграммой направленности [4, 5] линейной эквидистантной антенной решетки, известны способы получения желаемого уровня боковых лепестков, и также известно влияние расстояния между излучателями в линейной эквидистантной антенной решетки на возникновение дифракционных максимумов в диаграмме направленности. Известно, что расстояние между антенными излучателями в линейной антенной решетке влияет на вид диаграммы направленности, на характер дифракционных лепестков [6].

Актуальна задача фокусировки излучения линейных антенных решеток на заданное конечное расстояние [7]. При этом обеспечивается синфазное сложение электромагнитных волн, излученных всеми элементами антенной решетки в заданной точке пространства. Традиционно эту возможность используют в задачах, требующих сохранения диаграммы направленности антенны в ближней или промежуточной зоне. Отклонение от точки фокусировки, очевидно, приводит к искажениям диаграммы направленности [8–11]. Как правило, исследование антенных решеток, сфокусированных на конечное расстояние, ограничено вопросами определения размера области пространства вблизи точки фокусировки, в пределах которой диаграмма направленности искажается в приемлемых пределах.

Вместе с тем исследователи отмечают, что в окрестности точки фокусировки наблюдается возрастание напряженности электрического поля относительно уровня, характерного в этой точке для антенной решетки, сфокусированной на бесконечное расстояние [7]. Это объясняется синфазным сложением электромагнитных волн от элементов парциальной решетки. Очевидно, что повышение напряженности электрического поля в заданной точке может быть использовано и при формировании максимума амплитуды напряженности электрического поля для излучения беспроводных сетей передачи данных для улучшения отношения сигнал/шум в заданной области.

Цель настоящей работы: оценить возможность формирования максимума напряженности электрического поля в заданной точке пространства с помощью сфокусированной линейной антенной решетки. Подтвердить, что задачи по фокусировке антенной решетки (обеспечение синфазного сложения волн в заданной точке пространства) и формирование максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства необходимо разделять.

### 1. Формирование максимума амплитуды напряженности электрического поля в одной точке пространства

Фокусировка электромагнитного поля в пространстве является следствием физического явления – интерференции. Интерференцией называют взаимодействие нескольких когерентных электромагнитных волн. Когерентностью в данном случае называют случай, когда разность фаз между несколькими электромагнитными волнами постоянна во времени, т. е. электромагнитные волны имеют равную частоту (длину волны).

Традиционно формулируемая задача фокусировки излучения антенной решетки в заданную точку предполагает обеспечение синфазности в этой точке электромагнитных волн, сформированных элементами решетки.

Рассмотрим изменение амплитуды напряженности электрического поля в зависимости от дальности до антенной решетки. Электромагнитная волна характеризуется плотностью потока мощности, которая, усредненная по промежутку времени, называется интенсивностью электромагнитного излучения [12]:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{dP}{dS} dt = \frac{1}{T} \int_0^T |\vec{P}(t)| dt, \quad (1)$$

где  $T$  – промежуток времени усреднения;  $dS$  – площадь, через которую переносится энергия;  $P$  – мощность электромагнитной волны;  $|\vec{P}(t)|$  – модуль вектора Пойнтинга. Поток мощности, исходящий от источника, можно представить в виде некоторого количества линий, которые выходят из него, а количество линий будет зависеть от излучаемой мощности источника [12–15]. В свободном пространстве

( $\epsilon_r = 1$ ;  $\mu_r = 1$ ) количество линий потока от источника не зависит от расстояния от источника, линии потока мощности распространяются в трехмерном пространстве. Чем дальше от источника линии потока мощности, тем через большую площадь поверхности они проходят, которая связана с площадью сферы ( $S_{\text{сф}} = 4\pi r^2$ ).

Учитывая, что амплитуда и мощность связаны между собой соотношением  $A = \sqrt{P \cdot Z}$ , где  $P$  – мощность,  $Z$  – электрический импеданс, то становится ясно, что в дальней зоне мощность с ростом расстояния снижается в  $r^{-2}$  раз, тогда амплитуда напряженности электрического поля будет снижаться в  $r^{-1}$  раз.

Таким образом, можно записать выражение, связывающее амплитуду напряженности электрического поля и расстояние до антенной решетки (без учета фазы):

$$A(r) = A_0 r^{-q}, \quad (2)$$

где  $A_0$  – начальное (в точке излучения) значение амплитуды напряженности электрического поля;  $q$  – величина, устанавливающая, по какому закону происходит спад амплитуды напряженности электрического поля. В ближней зоне  $q = 2$ , в дальней зоне  $q = 1$  [1, 6]. При  $q = 0$  амплитуда напряженности электрического поля не изменяется с ростом расстояния.

Проведем оценки зависимости амплитуды напряженности электрического поля от расстояния до антенной решетки малого размера. Расчет выполним для антенной решетки, сфокусированной на бесконечность (начальные фазы сигналов, подводимых ко всем излучателям, равны друг другу) и сфокусированной в заданную точку пространства. Количество элементов рассматриваемой антенной решетки  $N = 5$ , расстояние между излучателями  $d = 60$  мм ( $\frac{d}{\lambda} = 0,5$ ). Расчет проведем с учетом эффекта снижения интенсивности напряженности электрического поля в зависимости от дальности до антенной решетки ( $q = 1$ ) и для гипотетического случая, не учитывающего снижения интенсивности ( $q = 0$ ). На рис. 1 представлены зависимости нормированной к своему максимальному значению амплитуды напряженности электрического поля от расстояния для антенной решетки, сфокусированной на бесконечность (сплошная линия с учетом эффекта снижения интенсивности  $q = 1$ ; пунктирная линия без учета эффекта снижения интенсивности  $q = 0$ ). Из рис. 1 видно, что, как и ожидалось, при  $q = 0$  амплитуда напряженности электрического поля не меняется с расстоянием от антенной решетки.

Для фокусировки антенной решетки в заданную точку необходимо рассчитать по выражению (3) расстояние между каждым антенным излучателем и точкой фокусировки. Исходя из рассчитанного расстояния по выражению (4) определяются начальные фазы сигналов [7].

$$x_n = \sqrt{F^2 + (n - N/2)^2 d^2} - F, \quad (3)$$

где  $F$  – расстояние между геометрическим центром антенной решетки и точкой в пространстве, в которой необходимо обеспечить приход сигналов синфазно;

$n$  – номер излучателя;  $d$  – расстояние между излучателями;  $N$  – количество излучателей антенной решетки

$$\phi_n = x_n \cdot \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (4)$$

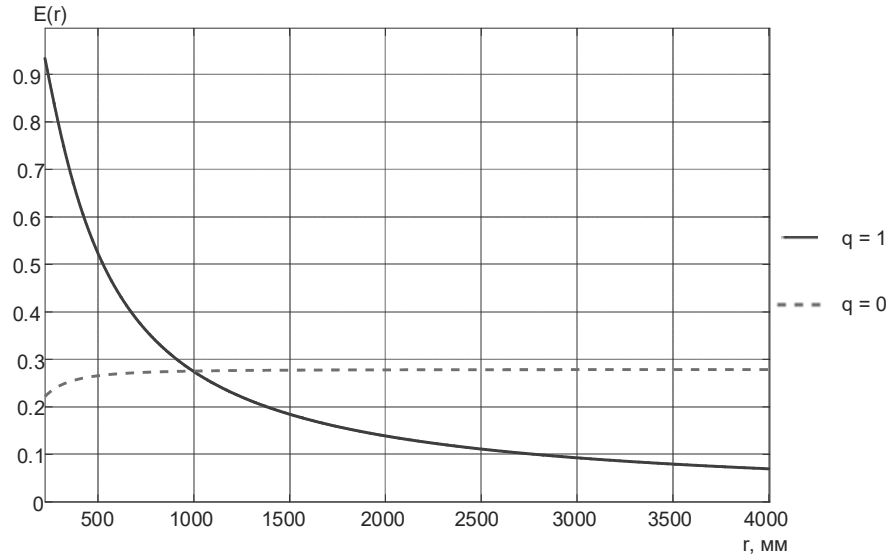


Рис. 1 – Зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния для антенной решетки, сфокусированной на бесконечность

Fig. 1 – Dependence of the amplitude of the electric field strength on the distance for an antenna array focused to infinity

Проведем расчет зависимости амплитуды напряженности от расстояния до антенной решетки, сфокусированной на конечное расстояние. Расчет, как и прежде, проведем с учетом эффекта снижения интенсивности напряженности электрического поля от расстояния и без него. Фокусное расстояние 800 мм. Результат расчета приведен на рис. 2.

На рис. 2 видно, что для  $q=1$  явно выраженного максимума амплитуды напряженности электрического поля в окрестностях точки фокусировки нет. Это объясняется снижением интенсивности с ростом дальности от решетки. Амплитуда напряженности электрического поля обратно пропорциональна расстоянию от антенной решетки. При отсутствии эффекта снижения интенсивности ( $q=0$ ) наблюдается максимум напряженности электрического поля точно в заданной точке фокусировки. При этом, сравнивая фазовые портреты для случая с наличием эффекта снижения интенсивности (рис. 3, а) и для случая без его учета (рис. 3, б), мы наблюдаем, что электромагнитные волны приходят синфазно точно в координаты фокусировки (800 мм). В точке фокусировки амплитуда напряженности электрического поля для антенной решетки, сфокусированной на бесконечность, меньше на 0,17 дБ по сравнению с антенной решеткой, сфокусированной на конечное расстояние.

Фактически, фокусировка в рассматриваемую точку для такой антенной решетки не дает выигрыша в напряженности в сравнении с антенной решеткой, сфокусированной на бесконечность.

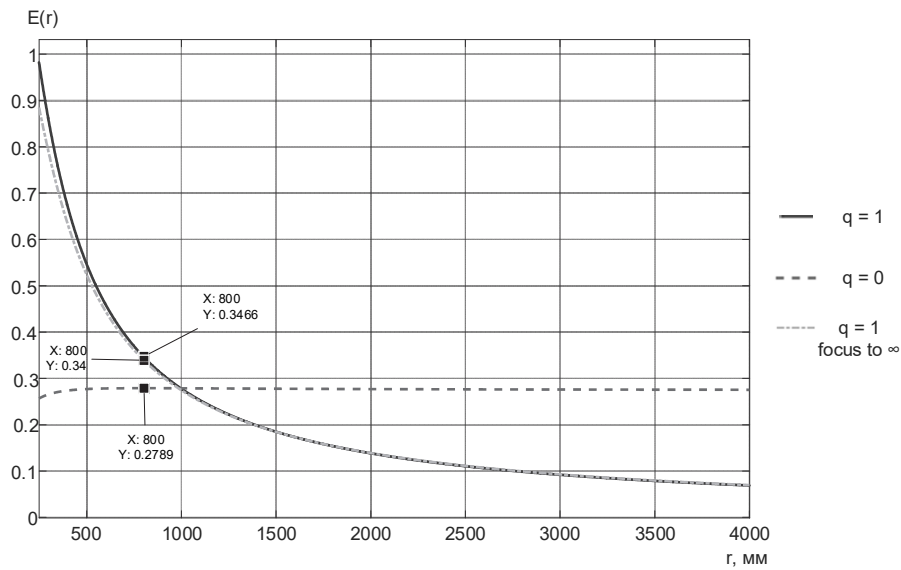


Рис. 2 – Зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния для антенной решетки, сфокусированной на расстояние 800 мм

Fig. 2 – Dependence of the amplitude of the electric field strength on the distance for an antenna array focused at a distance of 800 mm

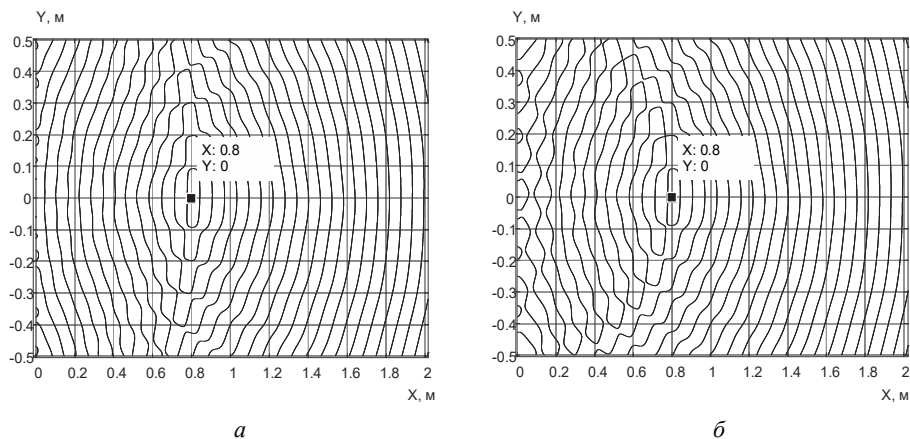


Рис. 3 – Фазовый портрет для антенной решетки, сфокусированной на расстояние 800 мм:

$$N = 5; a - q = 1; b - q = 0$$

Fig. 3 – A phase portrait for an antenna array focused at a distance of 800 mm:

$$N = 5; a - q = 1; b - q = 0$$

Известны способы фокусировки одномерных антенных решеток в заданную точку [7, 16–21], в них получают ожидаемый нами результат – наблюдается максимум напряженности электрического поля. Однако в рассмотренных способах используются антенные решетки с большим количеством излучателей.

На рис. 4 представлена зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния для большой антенной решетки ( $N = 50$ ,  $d = 60$  мм), сфокусированной на бесконечность. На том же рисунке представлены зависимости

амплитуды напряженности электрического поля от расстояния для той же антенной решетки, сфокусированной на расстояние 3000 мм, с наличием эффекта снижения интенсивности ( $q = 1$ ) и без учета его ( $q = 0$ ).

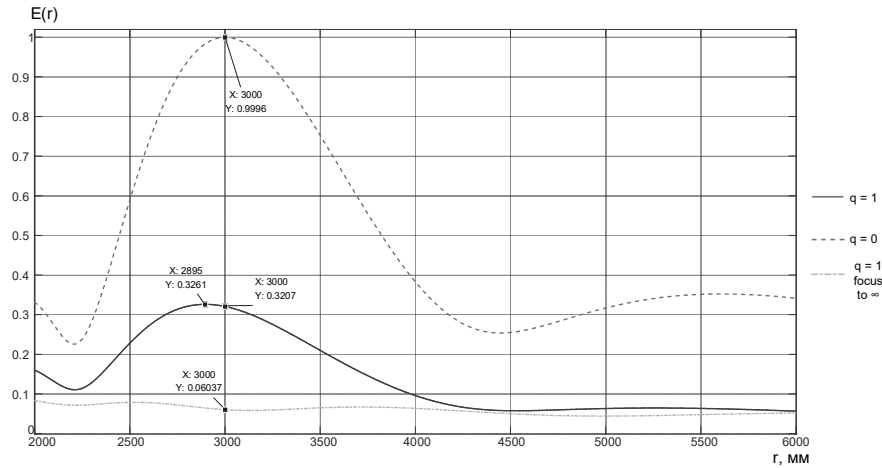


Рис. 4 – Зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния.  $N = 50$

Fig. 4 – Dependence of the amplitude of the electric field strength on the distance.  $N = 50$

Исходя из результатов расчетов, показанных на рис. 4, видно, что при фокусировке больших антенных решеток наблюдается максимум напряженности электрического поля в окрестностях точки фокуса. Однако местоположение этого максимума не совпадает с точкой фокусировки. Он оказывается смещен от точки фокуса в сторону антенной решетки. Объясняется это снижением интенсивности с изменением расстояния. Фактически, сдвиг максимума напряженности происходит из-за противоборства двух физических явлений. С одной стороны, по мере приближения к точке фокуса фазы электромагнитных волн, излученных элементами антенной решетки, сближаются, что приводит к росту суммарной напряженности. С другой стороны, наблюдается спад напряженности из-за множителя  $1/r$ . Схематично это проиллюстрировано на рис. 5. Очевидно, что чем больше элементов в антенной решетке, тем сильнее первый процесс – максимум напряженности электрического поля в этом случае будет ближе к точке фокусировки (точке синфазного сложения).

Для того, чтобы оценить влияние размеров антенной решетки на смещение максимума амплитуды напряженности электрического поля, проведем расчет двух зависимостей для антенных решеток, параметры которых представлены в таблице.

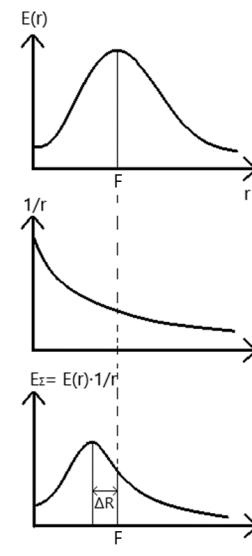
1. Зависимость амплитуды напряженности электрического поля от расстояния для антенных решеток, имеющих разное количество излучателей, но равные линейные размеры (антенные решетки 1–3 в таблице). Результат представлен на рис. 6.

2. Зависимость амплитуды напряженности электрического поля для антенных решеток, имеющих разное количество излучателей, но постоянный шаг между излучателями (антенные решетки 4–6 в таблице). Результат представлен на рис. 7.

Во всех расчетах полагалось, что точка фокусировки расположена на расстоянии 800 мм от антенной решетки и мощности, излучаемые всеми антенными решетками, равны между собой.

Рис. 5 – К пояснению смещения максимума напряженности электрического поля относительно точки фокусировки

Fig. 5 – Explanation of the displacement of the maximum electric field strength relative to the focusing point



#### Параметры рассматриваемых антенных решеток

#### Parameters of the antenna arrays being studied

№	N	d
1	10	$\lambda/2$
2	5	$\lambda$
3	3	$3\lambda/2$
4	12	$\lambda/2$
5	15	$\lambda/2$
6	20	$\lambda/2$

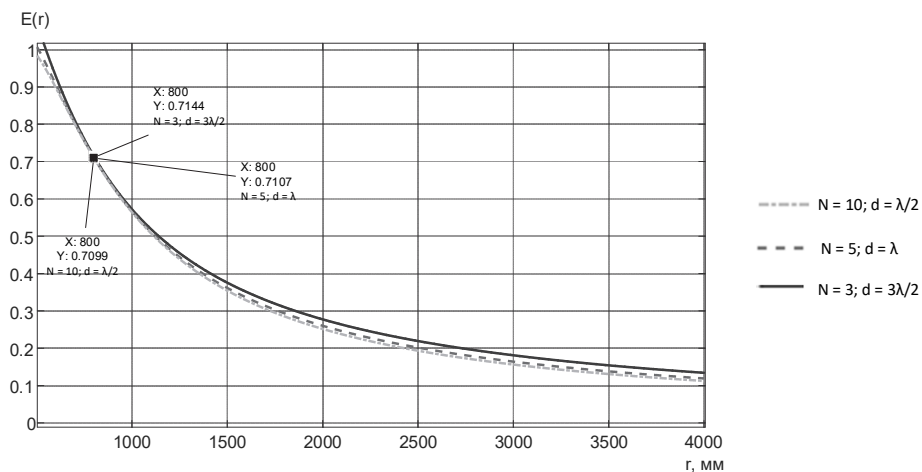


Рис. 6 – Зависимость амплитуды напряженности электрического поля для антенных решеток, имеющих равные линейные размеры

Fig. 6 – Dependence of the amplitude of the electric field strength for antenna arrays having equal linear dimensions

Исходя из результатов, показанных на рис. 6, понятно, что зависимость амплитуды напряженности электрического поля от дальности до антенной решетки практически не отличается для антенных решеток, имеющих разное количество излучателей, но равный линейный размер (мощности, излучаемые каждой из трех антенных решеток равны между собой). В точке фокуса во всех трех случаях формируется одинаковое значение напряженности электрического поля. Стоит отметить, что антенная решетка, содержащая большее количество излучающих элементов, обеспечивает больший градиент амплитуды напряженности электрического поля в точке фокусировки. В целом можно утверждать, что уровень напряженности в точке фокуса определяется размером антенной решетки и не зависит от количества излучателей в ней.

Это утверждение несложно подтвердить аналитически. Для антенной решетки, состоящей из  $N$  излучателей, амплитуда суммарного сигнала в точке фокусировки определяется выражением

$$A_{\Sigma} = \left| \sum_{n=1}^N \frac{1}{r_n} A_n e^{j\phi_n} \right|, \quad (5)$$

где  $r_n$  – расстояние от  $n$ -го излучателя антенной решетки до точки фокусировки;  $A_n$  – амплитуда сигнала, излучаемого  $n$ -м элементом антенной решетки;  $\phi_n$  – фаза в точке фокусировки сигнала, излученного  $n$ -м элементом антенной решетки.

С учетом того, что в точке наблюдения сигналы всех элементов антенной решетки складываются синфазно ( $\phi_n = \phi$ ), а также принимая излучаемую мощность постоянной при любом количестве элементов антенной решетки ( $A_n^2 = \frac{1}{N}$ ), выражение (5) можно записать в следующем виде:

$$A_{\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( \frac{1}{r_n} e^{j\phi} \right)^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{r_n^2}}. \quad (6)$$

В выражении (6) под корнем стоит среднее значение величины, обратной квадрату расстояния от элемента антенной решетки до точки фокуса величины  $\frac{1}{r^2}$ .

Несложно убедиться, что при фиксированной длине эквидистантной антенной решетки ( $L = Nd = \text{const}$ ) расчет по выражению (6) будет давать постоянное значение для любых сочетаний  $N$  и  $d$ .

Оценим максимальную величину  $A_{\Sigma}$ . При заданном фокусном расстоянии величина  $A_{\Sigma}$  определяется размером антенной решетки. При возрастании размера антенной решетки среднее расстояние до ее элементов увеличивается. Как следует из (6), это приведет к снижению амплитуды напряженности электрического поля в точке фокусировки. Можно записать нестрогое неравенство, определяющее максимальную амплитуду напряженности электрического поля в точке фокусировки для сфокусированных линейных антенных решеток:

$$A_{\Sigma} \leq \frac{1}{F}. \quad (7)$$

Знак равенства в (7) справедлив для антенной решетки, состоящей из одного излучателя. При этом среднее расстояние до элемента антенной решетки равно



фокусному расстоянию. Это означает, что напряженность электрического поля, формируемая сфокусированной антенной решеткой, будет всегда меньше напряженности, формируемой одиночным излучателем, при равных излучаемых мощностях.

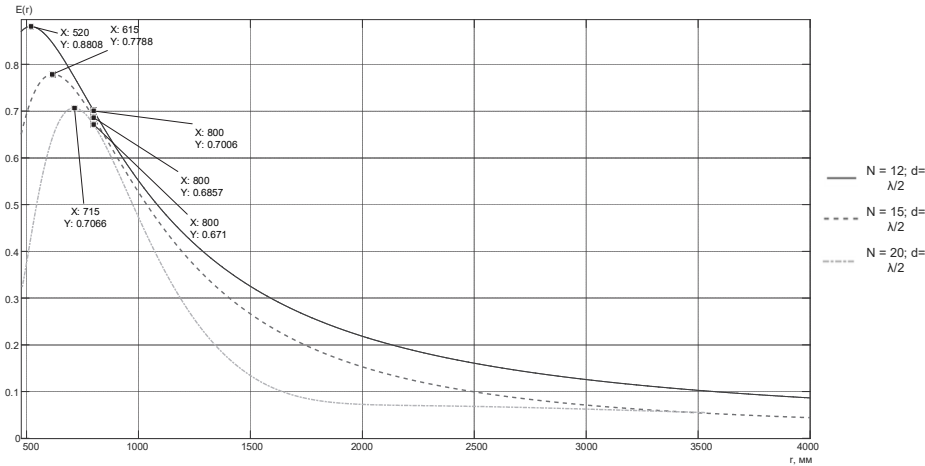


Рис. 7 – Зависимость амплитуды напряженности электрического поля, для антенных решеток, имеющих разные линейные размеры

Fig. 7 – Dependence of the amplitude of the electric field strength for antenna arrays with different linear dimensions

Исходя из результатов, показанных на рис. 7, можно заметить следующее.

1. При фокусировке линейной антенной решетки в заданную точку максимум амплитуды напряженности электрического поля формируется не в точке синфазного сложения волн, излученных элементами антенной решетки (точка фокусировки), а смещен в сторону к антенной решетке.

2. Чем больше размер антенной решетки, тем меньше смещение максимума напряженности электрического поля от точки фокусировки при фиксированном ее положении.

Результат расчета величины смещения точки, в которой расположен максимум напряженности электрического поля от точки синфазного сложения электромагнитных волн, представлен на рис. 8. Из рисунка видно, что при увеличении размера антенной решетки относительно фокусного расстояния величина ошибки позиционирования максимума напряженности электрического поля снижается. Для малых фокусных расстояний величина ошибки позиционирования максимума выше. Это объясняется более быстрым спадом напряженности электрического поля вблизи антенной решетки.

Для совмещения максимума напряженности электрического поля и точке фокусировки линейной антенной решетки требуется антенная решетка размером, значительно превышающим фокусное расстояние. Так, из рис. 8 видно, что даже для обеспечения ошибки позиционирования в 10 % от величины фокусного расстояния требуется антенная решетка, размер которой будет больше фокусного расстояния.

Важно отметить, что полученные кривые не зависят от количества излучателей, составляющих антенную решетку, а определяются только размером антенной решетки, т. е. разностю ее крайних излучателей.

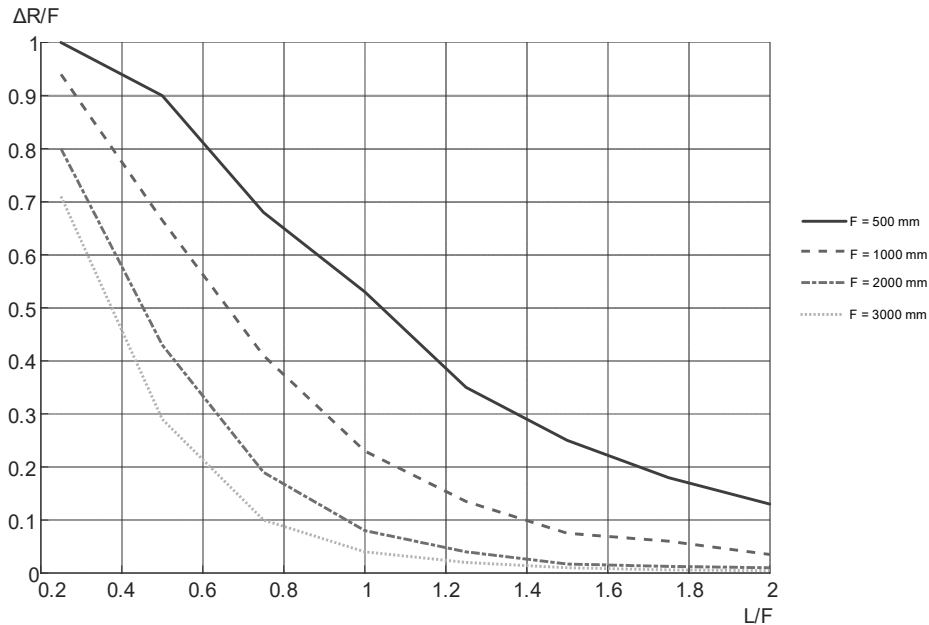


Рис. 8 – Зависимость величины смещения максимума амплитуды напряженности электрического поля от линейных размеров антенной решетки

Fig. 8 – Dependence of the displacement of the maximum amplitude of the electric field strength on the linear dimensions of the antenna array

### Закключение

1. При фокусировке линейных антенных решеток в заданную точку наблюдается смещение максимума напряженности электрического поля в направлении к антенной решетке, обусловленное снижением амплитуды напряженности электрического поля при удалении от источника излучения.
2. Смещение максимума напряженности электрического поля тем сильнее, чем меньше размер антенной решетки. Для антенной решетки большого размера (кратно превышающего величину фокусного расстояния) смещение не превышает единиц процентов от фокусного расстояния.
3. Одномерные антенные решетки при фокусировке в заданную точку пространства не обеспечивают совмещения точки максимума напряженности электрического поля и точки синфазного сложения электромагнитных волн.
4. Необходимо разделять задачи по фокусировке антенной решетки (обеспечение синфазного сложения волн в заданной точке пространства) и формирование максимума амплитуды напряженности электрического поля в заданной точке пространства.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Iuzvik D., Stepanov M. Focusing of the electromagnetic field in several given areas of space // Progress In Electromagnetics Research M. – 2022. – Vol. 113. – P. 11–22.
2. Iuzvik D., Stepanov M. Decomposition of an antenna array focused at several space points // 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – IEEE, 2022. – P. 1020–1023.
3. Cai X., Gu X., Geyi W. Optimal design of antenna arrays focused on multiple targets // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2020. – Vol. 68 (6). – P. 4593–4603.

4. Способы изменения формы диаграммы направленности фазированной антенной решетки миллиметрового диапазона / В.И. Парфенов, И.Ф. Струков, Н.А. Кунаева, К.А. Струков // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. – 2018. – № 1. – С. 35–43.
5. **Delos P., Broughton B., Kraft J.** Phased array antenna patterns – Part 1: Linear array beam characteristics and array factor // *Analog Dialogue*. – 2020. – Vol. 54 (2). – P. 1–8.
6. **Сколник М.И.** Справочник по радиолокации. – М.: Техносфера, 2014. – 456 с.
7. **Смирнов В.Ю., Никитин О.Р.** Линейные фазированные антенные решетки, сфокусированные в ближней зоне // Вестник РГРТУ. – 2008. – № 4 (26). – С. 32–34.
8. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля: основы теории и технические приложения / под общ. ред. Ю.Е. Седельникова и Н.А. Тестоедова. – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосм. ун-т им. М.Ф. Решетнева, 2015. – 308 с.
9. **Низамутдинов Р.Р.** Исследование характеристик линейных сфокусированных антенн для радиоволновых технологических и диагностических устройств: дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 2011. – 155 с.
10. **Халикова К.Н.** Антенны, сфокусированные в области ближнего излученного поля для задач микроволновых технологий: дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 2017. – 166 с.
11. **Chu H., 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. – P. 1–2.
12. **Poynting J.H.** On the transfer of energy in the electromagnetic field // *Philosophical Transactions of the Royal Society*. – 1884. – Vol. 175. – P. 343–361.
13. **Stratton J.A.** Electromagnetic theory. – New York: McGraw-Hill book company, inc., 1941. – 640 p.
14. **Grant I., Phillips W.** Electromagnetism. – New York: Wiley, 1990. – 544 p.
15. **Griffiths D.** Introduction to electrodynamics. – Boston: Pearson, 2012. – 596 p.
16. **Sun L., Li F.** A near-field focused array antenna with reconfigurable elements // 2016 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). – IEEE, 2016. – P. 319–320.
17. **Huang R., Liu B.** A near-field focused circular array based on dielectric resonator antenna // 2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI). – IEEE, 2021. – P. 1165–1166.
18. **Sohail M., Uyguroğlu R.** Near field focused microstrip patch antenna array characteristics enhancement with parasitic patch elements // 2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). – IEEE, 2021. – P. 1–4.
19. **Ju H.S., Cho Y.** Radiation characteristics of near-field beam focusing for an active array antenna // 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). – IEEE, 2018. – P. 1–2.
20. Focusing characteristics of near-field radiations from multi-panels of phased array of antennas in circularly cylindrical arrangement / H.-T. Chou, J.-W. Liu, C.-Y. Liu, P. Nepa // 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). – IEEE, 2017. – P. 1–2.
21. **Jiang Y., Geyi W., Yang L.** Circularly-polarized focused microstrip antenna arrays // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. – 2015. – Vol. 15. – P. 52–55.

## FORMATION OF THE MAXIMUM OF ELECTRIC FIELD STRENGTH AT A GIVEN SPACE POINT BY A FOCUSED LINEAR ANTENNA ARRAY

**Iuzvik D.A., Stepanov M.A.**

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

The possibility of forming a maximum of the electric field strength at a given point in space with the help of a focused one-dimensional linear antenna array is considered. It is shown that the location of the maximum electric field strength does not coincide with the point of in-phase addition of electromagnetic waves emitted by the elements of the antenna array - the focusing point.

The dependence of the shift of the maximum electric field strength on the focus point for various focal lengths and sizes of antenna arrays is presented. It has been found that the value of the shift in the focusing coordinates is determined only by the size of the antenna array and does not depend on the number of its elements. The relationship between a decrease in the intensity of an electromagnetic wave and a shift in the maximum amplitude of the electric field strength is described. The paper presents the dependences of the amplitude of the electric field strength for antenna arrays of various linear sizes and the calculation results confirmed the theoretical concepts. A phase portrait for antenna arrays of various sizes is presented showing the in-phase arrival of waves at a given point in space. According to the family of dependencies presented in the paper, it can be concluded that the greater the ratio of the linear dimensions of the antenna array to the focal length, the smaller the shift in the maximum amplitude of the electric field strength.

**Keywords:** antenna arrays, focusing of linear antenna arrays, ensuring the maximum amplitude of the electric field strength.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-3-67-79

#### REFERENCES

1. Iuzvik D., Stepanov M. Focusing of the electromagnetic field in several given areas of space. *Progress In Electromagnetics Research M*, 2022, vol. 113, pp. 11–22.
2. Iuzvik D., Stepanov M. Decomposition of an antenna array focused at several space points. *2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*. IEEE, 2022, pp. 1020–1023.
3. Cai X., Gu X., Geyi W. Optimal design of antenna arrays focused on multiple targets. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, vol. 68 (6), pp. 4593–4603.
4. Parfenov V.I., Strukov I.F., Kunaeva N.A., Strukov K.A. Sposoby izmeneniya formy diagrammy napravlenosti fazirovannoi antennoi reshetki millimetrovogo diapazona [Methods of change of the form of antenna pattern of phased array of a millimeter range]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika = Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2018, no. 1, pp. 35–43.
5. Delos P., Broughton B., Kraft J. Phased array antenna patterns – Part 1: Linear array beam characteristics and array factor. *Analog Dialogue*, 2020, vol. 54 (2), pp. 1–8.
6. Skolnik M.I. *Spravochnik po radiolokatsii* [Handbook of radar]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2014. 456 p.
7. Smirnov V.Yu., Nikitin O.R. Lineinye fazirovannye antennye reshetki, sfokusirovannye v blizhnei zone [Linear phased antenna arrays focused in the near field]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2008, no. 4 (26), pp. 32–34.
8. Sedel'nikov Yu.E., Testodov N.A., eds. *Antenny, sfokusirovannye v zone blizhnego izluchennogo polya: osnovy teorii i tekhnicheskie prilozheniya* [Antennas focused in the zone of the near radiated field. Fundamentals of the theory and technical applications]. Krasnoyarsk, Siberian State Aerospace University Publ., 2015. 308 p.
9. Nizamutdinov R.R. *Issledovanie kharakteristik lineinykh sfokusirovannykh antenn dlya radiovolnovykh tekhnologicheskikh i diagnosticheskikh ustroystv*. Diss. kand. tekhn. nauk [Study of the characteristics of linear focused antennas for radio wave technological and diagnostic devices. PhD eng. sci. diss.]. Kazan, 2011. 155 p.
10. Khalikova K.N. *Antenny, sfokusirovannye v oblasti blizhnego izluchennogo polya dlya zadach mikrovolnovykh tekhnologii*. Diss. kand. tekhn. nauk [Antennas focused in the near radiated field for microwave technology applications. PhD eng. sci. diss.]. Kazan, 2017. 166 p.
11. Chu H., 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, pp. 1–2.
12. Poynting J.H. On the transfer of energy in the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1884, vol. 175, pp. 343–361.
13. Stratton J.A. *Electromagnetic theory*. New York, McGraw-Hill book company, inc., 1941. 640 p.

14. Grant I., Phillips W. *Electromagnetism*. New York, Wiley, 1990. 544 p.
15. Griffiths D. *Introduction to electrodynamics*. Boston, Pearson, 2012. 596 p.
16. Sun L., Li F. A near-field focused array antenna with reconfigurable elements. *2016 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*. IEEE, 2016, pp. 319–320.
17. Huang R., Liu B. A near-field focused circular array based on dielectric resonator antenna. *2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)*. IEEE, 2021, pp. 1165–1166.
18. Sohail M., Uyguroğlu R. near field focused microstrip patch antenna array characteristics enhancement with parasitic patch elements. *2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. IEEE, 2021, pp. 1–4.
19. Ju H.S., Cho Y. Radiation characteristics of near-field beam focusing for an active array antenna. *2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*. IEEE, 2018, pp. 1–2.
20. Chou H.-T., Liu J.-W., Liu C.-Y., Nepa P. Focusing characteristics of near-field radiations from multi-panels of phased array of antennas in circularly cylindrical arrangement. *2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*. IEEE, 2017, pp. 1–2.
21. Jiang Y., Geyi W., Yang L. Circularly-polarized focused microstrip antenna arrays. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, vol. 15, pp. 52–55.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Юзвик Денис Андреевич** – родился в 1994 году, аспирант кафедры РПиППУ, НГТУ. Область научных интересов: моделирование антенных решеток, СВЧ-устройств, электромагнитных полей. Опубликовано 11 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 11 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: zetanicestar@gmail.com).



**Степанов Максим Андреевич** – д-р техн. наук, заведующий кафедрой РПиППУ 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 23 июня 2023 г.

Received June 23, 2023

## To Reference:

Iuzvik D.A., Stepanov M.A. Formirovanie maksimuma napryazhennosti elektricheskogo polya v zadannoi tochke prostranstva sfokusirovannoi lineinoi antennoi reshetkoi [Formation of the maximum of electric field strength at a given space point by a focused linear antenna array]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 3 (60), pp. 67–79. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-3-67-79.