

АНТЕННЫ, ВОЛНОВОДНАЯ И КВАЗИОПТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

УДК 538.3: 621.396.67

А. А. БУЛГАКОВА, Н. Н. ГОРОБЕЦ, В. А. КАТРИЧ,
В. А. ЛЯЩЕНКО

PACS number: 07.57.-c

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина
E-mail: Nikolay.N.Gorobets@univer.kharkov.ua

КОЭФФИЦИЕНТ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Предмет и цель работы: Теоретически исследуются коэффициенты направленного действия (КНД) линейных и плоских антенных решеток в зависимости от расстояния между излучателями и длины волны.

Методы и методология: Вычислительными методами прикладной математики в среде MathCad рассчитаны двукратные интегралы от диаграммы направленности по мощности во всем пространстве наблюдения, определяющие КНД в самом общем виде. Диаграммы направленности излучателей – элементов антенных решеток задаются математическими моделями. При расчетах учитывается, что подынтегральная функция быстроосциллирующая.

Результаты: Выполнены расчеты и анализ зависимости КНД от числа излучателей и расстояний между ними в долях длины волны. Показано, что при отношении расстояния между излучателями к длине волны $d/\lambda = 0.5$ КНД решетки изотропных излучателей равен $1.5N^2$, N – число излучателей в решетке. При увеличении этого отношения до $0.65 \div 0.97$ КНД увеличивается по близкому к линейному закону до максимально возможного значения при заданном числе излучателей. При увеличении d/λ до значений больше единицы КНД значительно уменьшается (эффект “ослепления” нефазированных антенных решеток) и его зависимость с ростом d/λ носит затухающий осциллирующий характер. Этим передаточная функция антенных решеток принципиально отличается от передаточных функций непрерывных антенн.

Закключение: Антенные решетки искажают форму и спектр излучаемых и принимаемых сигналов вследствие нерегулярного изменения их КНД в зависимости от длины волны. Обнаруженный эффект “ослепления” нефазированных антенных решеток больших электрических размеров необходимо учитывать в широкополосных и сверхширокополосных радиоэлектронных системах, особенно в радиоастрономии, телекоммуникационных системах и сверхширокополосной радиолокации.

Ключевые слова: антенные решетки, коэффициент направленного действия, диаграмма направленности, слабонаправленные излучатели, численный анализ

1. Введение

Показатели качества работы радиоэлектронных систем (РЭС): дальность действия и форма рабочей области пространства, чувствительность, достижимая точность и качество функционирования, помехозащищенность, возможность реализации многофункциональных и широкополосных режимов работы, надежность и др., – полностью или частично, но всегда в очень большой степени определяются антенной. Из всех многочисленных

электродинамических параметров и характеристик антенн важнейшим является коэффициент усиления (КУ), который, в свою очередь, определяется характеристиками направленности антенны через ее коэффициент направленного действия (КНД). КУ и КНД количественно определяют чувствительность РЭС, размеры и конфигурацию рабочей области в телекоммуникационных системах, дальность действия и разрешающую способность РЭС, помехозащищенность и т. д. Другими словами, прямо или косвенно КУ и КНД определяют почти все технические характеристики РЭС. Этим объясняется большое количество статей, монографий и учебников, в которых в большей или

меньшей степени исследуется КНД антенных систем. При этом КПД определяется потерями на нагревание антенно-фидерного тракта, согласованием антенны с фидерным трактом, потерями на преобразование типов волны и другими подобными процессами, не связанными прямо с характеристиками направленности антенны. А КНД для всех типов и вариантов антенн определяется через диаграмму направленности (ДН), известную во всем пространстве наблюдения:

$$D_m = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |F(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi}. \quad (1)$$

Здесь $|F(\theta, \varphi)|$ – ДН антенны по амплитуде поля, электрического E или магнитного H – не имеет значения, так как в дальней зоне $E = W_0 H$, где $W_0 = 120\pi$ Ом – волновое сопротивление свободного пространства – не зависит от координат точек наблюдения. Отметим, что это положение нарушается для ближней зоны антенны.

Эта самая общая формула на практике используется крайне редко по целому ряду причин, главные из которых следующие.

1. ДН реальных антенн, кроме идеализированных случаев элементарных электрического и магнитного диполей Герца в свободном пространстве ($D_m = 1.5$), полуволнового вибратора ($D_m = 1.64$) и излучателя Гюйгенса ($D_m = 3.0$), как правило, известны только для главных E и H плоскостей наблюдения.

2. Интегрирование ДН по всему пространству наблюдения согласно (1) численными методами довольно затруднительно, т. к. подынтегральная функция имеет быстро осциллирующий характер.

3. Поляризационная структура излучения реальных антенн во всем пространстве наблюдения весьма сложна и разнообразна, поэтому расчет КНД по полю основной компоненты излучения и по полю кросс-поляризованной компоненты, что часто важно на практике, связан с дополнительными трудностями.

Однако современная мощная быстродействующая компьютерная техника позволяет преодолеть эти трудности и обеспечить высокую точность расчетов КНД антенных решеток [1].

В настоящей статье на основе известных методов вычислительной математики рассчитаны

КНД линейных и плоских однородных синфазных антенных решеток (нефазированных антенных решеток) изотропных излучателей, излучателей Гюйгенса, диполей Герца и полуволновых вибраторов, излучателей в виде открытых концов прямоугольных волноводов, расположенных в свободном пространстве. Результаты расчетов аппроксимированы с точностью не хуже 5 % простыми, удобными для практики формулами.

2. Постановка задачи

Как следует из (1), КНД антенны определяется исключительно ДН антенны. В свою очередь, ДН определяется электрическими размерами и формой излучающего раскрытия антенны и амплитудно-фазовым распределением переменных токов или полей в раскрытии. В частности, при постоянном амплитудно-фазовом распределении токов в случае линейной непрерывной антенны ДН осесимметричная и в сферической системе координат описывается формулой [2, 3]

$$F(\theta) = \frac{\sin\left(\pi \frac{L}{\lambda} \sin \theta\right)}{\pi \frac{L}{\lambda} \sin \theta}, \quad (2)$$

где L – длина антенны, λ – длина волны.

После подстановки (2) в (1) и интегрирования в [2, 3] при $L > \lambda$ получен с точностью не хуже 10 % КНД

$$D_m \approx 2 \frac{L}{\lambda}. \quad (3)$$

Отметим, что ДН в виде (2) не содержит множителя, описывающего ДН единичного центрального излучателя – диполя Герца в случае линейных проволочных антенн или излучателя Гюйгенса в случае антенн акустического и оптического типов. Так как в реальной антенне за счет направленных свойств единичного излучателя главный лепесток ДН уже, а амплитуды боковых и задних лепестков меньше, очевидно, что формула (3) для КНД приводит к существенно заниженным результатам.

Поставим в соответствие линейной непрерывной антенне с длиной L/λ линейную эквидистантную решетку такой же длины, образованную дискретными изотропными излучателями, расположенными на расстоянии половины длины волны

в свободном пространстве друг от друга. Если длина решетки определяется расстоянием между фазовыми центрами крайних излучателей, например в случае решетки изотропных излучателей или вибраторных антенн, расположенных перпендикулярно оси решетки в плоскости магнитного вектора поля, то $L/\lambda = (N-1)/2$ и КНД согласно (3) равен

$$D_m \approx N-1, \quad (4)$$

где N – число излучателей.

В случае решетки полуволновых вибраторных антенн, расположенных вдоль оси линейной решетки, $L/\lambda = N/2$ и без учета направленности излучателя – элемента решетки получаем согласно (3)

$$D_m = N. \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) не противоречат физике формирования ДН решеток, т. к. электрическая длина решетки с одинаковым числом излучателей во втором случае больше.

Последняя формула для эквидистантной решетки изотропных излучателей, расположенных на расстоянии $\lambda/2$, получена строго в [4] с учетом коэффициентов взаимных сопротивлений излучателей в решетке в виде

$$b_{nm} = 2 \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} d(m-n)\right)}{\frac{2\pi}{\lambda} d(m-n)},$$

где n, m – номера излучателей; d – расстояние между соседними излучателями.

При $d = \lambda/2$, так как m и n – целые числа, взаимные сопротивления $b_{nm} = 0$. Такой же вывод получен и в [5].

В линейных эквидистантных антенных решетках при увеличении d и сохранении неизменным числа излучателей КНД увеличивается и достигает максимума максимуму при $d \approx 0.9\lambda$ [6]. При большем увеличении d зависимость КНД имеет осциллирующий характер с убывающей амплитудой, что обусловлено возникновением дифракционных лепестков в ДН, и асимптотически стремится к N . Амплитуда осцилляций тем меньше, чем меньше число излучателей.

В литературе известны попытки учесть направленность излучателя – элемента линейной решетки при приближенном определении КНД решетки. Так, в [7] предложено определять КНД линейной решетки слабонаправленных излучателей с известным КНД D_{mo} путем его умножения на число излучателей:

$$D_m = D_{mo} N.$$

Таким образом, в случае линейной антенной решетки необходимо исследовать влияние расстояния между излучателями на характеристики направленности решетки, уточнить влияние направленности излучателя – элемента решетки на ее КНД, определить расстояние между излучателями в решетке с предельно достижимым значением КНД и найти это значение в зависимости от числа и типа излучателей. Изучение влияния расстояния между излучателями на КНД решетки особенно важно при работе решетки в режиме приема и излучения широкополосных и сверхширокополосных сигналов [8].

Перейдем к анализу КНД апертурных дискретных антенн. В случае непрерывных апертурных антенн с постоянным амплитудно-фазовым распределением поля в раскрытии КНД равен [2, 3]

$$D_m = \frac{4\pi}{\lambda^2} S,$$

где S – площадь излучающего раскрытия антенны.

При прямоугольной форме раскрытия $S = L_x L_y$. В случае равной по площади эквидистантной решетки изотропных излучателей $L_x = d(N-1)$, $L_y = d(M-1)$ и КНД решетки равен

$$D_m = 4\pi \frac{d^2}{\lambda^2} (N-1)(M-1).$$

Здесь N, M – числа излучателей по строкам и столбцам решетки соответственно. Для наиболее часто используемых на практике эквидистантных решеток с расстоянием между излучателями $d = \lambda/2$ и большим числом излучателей получаем часто встречающуюся в литературе формулу

$$D_m = \pi NM$$

или с учетом (5)

$$D_m = \pi D_{mx} D_{my}.$$

Такой же результат получен в [9]. В [10] приведено выражение для определения КНД в виде $D_m = 2D_{mx} D_{my}$. Как и в случае линейных решеток, направленные свойства излучателя – элемента плоской решетки в [7] предлагается учитывать через его КНД:

$$D_m = \pi D_{mo} NM = \pi D_{mo} D_{mx} D_{my}.$$

3. Анализ результатов расчетов

Для расчета и анализа КНД линейных и плоских однородных апертурных антенных решеток в зависимости от числа и типа излучателей, расстояния между ними, а также от формы излучающей апертуры использовалась исходная формула для КНД в наиболее общем виде (1). Амплитудно-фазовое распределение полей и токов в апертуре решетки принимались постоянными. Комплексный множитель системы излучателей в этом случае хорошо известен. Двукратные интегралы в (1) вычислялись в среде MathCad адаптивным методом, который обеспечивает высокую точность расчетов. Расчеты проводились в сферической системе координат в предположении, что решетка расположена в плоскости XOY, угол θ отсчитывается от оси OZ, направленной по нормали к раскрыву, а угол φ – от оси OX в плоскости XOY. Расчеты проводились для разного числа излучателей, расположенных в узлах квадратной сетки при изменении расстояния между излучателями от 0.5λ до 2.0λ . Для определенности расчеты проводились для решеток, образованных изотропными излучателями, излучателями Гюйгенса, диполями Герца и полуволновыми вибраторами, расположенными параллельно оси OX и параллельно оси OY, а также открытыми концами прямоугольных волноводов.

Выражение для ДН решетки принято в виде

$$F(\theta, \varphi) = F_0(\theta, \varphi) F_{cx}(\theta, \varphi) F_{cy}(\theta, \varphi),$$

где

$$F_{cx}(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{N}{2} kd \sin \theta \cos \varphi\right)}{N \sin\left(\frac{1}{2} kd \sin \theta \cos \varphi\right)},$$

$$F_{cy}(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{M}{2} kd \sin \theta \sin \varphi\right)}{M \sin\left(\frac{1}{2} kd \sin \theta \sin \varphi\right)}.$$

Для решетки излучателей Гюйгенса принято, что его ДН осесимметрично и описывается формулой

$$F_0(\theta) = \frac{1 + \cos \theta}{2}.$$

Выражение для ДН диполя Герца, расположенного вдоль оси OX, имеет вид

$$F_0(\theta, \varphi) = \sqrt{\cos^2 \theta \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi},$$

а для диполя Герца, расположенного параллельно оси OY, –

$$F_0(\theta, \varphi) = \sqrt{\cos^2 \theta \sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi}.$$

ДН полуволнового вибратора, расположенного параллельно оси OX, задается выражением

$$F_0(\theta, \varphi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta \cos \varphi\right)}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi}},$$

а вдоль оси OY – выражением

$$F_0(\theta, \varphi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta \sin \varphi\right)}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi}}.$$

По приведенным выше формулам в среде MathCad были проведены расчеты ДН во всем пространстве наблюдения и КНД линейных и плоских антенных решеток при изменении числа излучателей и расстояния между ними в широких пределах. В случае двумерных решеток излучатели располагались в узлах квадратной сетки, т. е. при одинаковых расстояниях между ними $d_x = d_y = d$. Заметим, что в случае квадратных решетки диполей Герца и решетки полуволновых вибраторов, расположенных параллельно оси OX и параллельно оси OY, ДН во всем пространстве имеют одинаковую форму, но повернуты на 90° . Следовательно, КНД таких вариантов антенных

решеток одинаковы. Это обстоятельство использовалось для проверки алгоритмов и программ для расчета КНД антенных решеток. В случае же линейных антенной решетки диполей Герца и решетки полуволновых вибраторов, параллельных или перпендикулярных оси линейки, ДН и КНД отличаются значительно. По-видимому, впервые на этот эффект обратили внимание Я. Н. Фельд и Л. С. Бененсон [2].

Для получения самых общих результатов и выводов относительно КНД антенных решеток эффекты взаимного влияния излучателей, а также краевые эффекты в решетках как явления более высокого порядка малости не учитывались. Не учитывались также явления изменения состояния поляризации излучения элементов антенной решетки при их размещении в решетках разных типов.

Рассмотрим характеристики направленности антенных решеток с одинаковым числом излучателей, но расположенных разным способом: в виде линейной решетки; в узлах квадратной сетки при квадратной или прямоугольной форме плоского излучающего раскрытия решетки. На рис. 1 приведены результаты расчетов КНД различных вариантов антенных решеток изотропных излучателей в зависимости от расстояния между излучателями, выраженного в длинах волн.

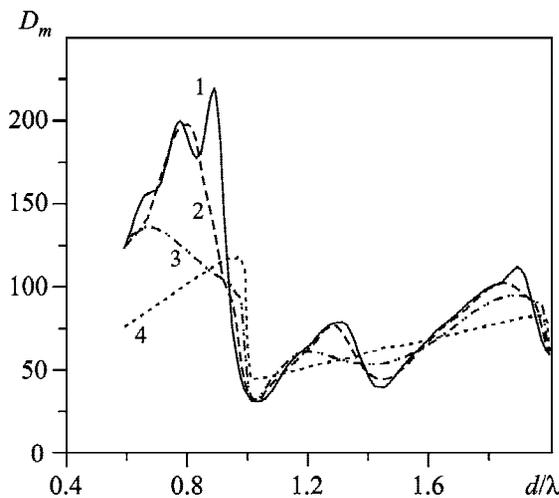


Рис. 1. Зависимости КНД от расстояния между элементами антенной решетки, образованной 64 изотропными излучателями, с разной формой апертуры: квадратной (кривая 1 – 8×8 элементов), прямоугольной (кривая 2 – 4×16 элементов), квазилинейной (кривая 3 – 2×32 элементов) и линейной (кривая 4 – 1×64 элементов)

В расчетах расстояние между излучателями изменялось от половины до двух длин волн. Число излучателей, равное $N = 64$, выбиралось из условия $N = 2^n$, поскольку однородную синфазную антенную решетку в этом случае можно реализовать на практике при использовании равноплечих делителей мощности, выполненных на основе полосковых линий, волноводных отрезков или отрезков коаксиальных кабелей.

На рис. 2 приведены аналогичные результаты расчетов для решеток излучателей Гюйгенса, на рис. 3 и 4 – для решеток диполей Герца и полуволновых вибраторов, ориентированных параллельно и перпендикулярно оси линейной решетки, на рис. 5 – для решеток открытых концов прямоугольных волноводов стандартного поперечного сечения, возбуждаемых волной основного типа.

Рассмотрим общие закономерности зависимости КНД антенных решеток от расстояния между излучателями при фиксированной рабочей частоте и от длины волны при фиксированном расстоянии между излучателями.

Очевидно, что наиболее общие выводы следуют из рис. 1, так как в этом случае ДН описывается только комплексным множителем. Другими словами, в этом случае диапазонные свойства решеток изотропных излучателей наиболее четко проявляются как “решеточные” эффекты,

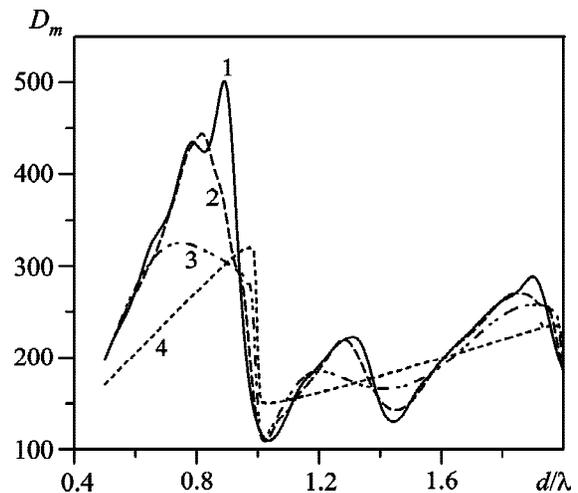


Рис. 2. Зависимости КНД от расстояния между элементами – излучателями Гюйгенса антенной решетки, образованной 64 излучателями, с разной формой апертуры: квадратной (кривая 1), прямоугольной (кривая 2), квазилинейной (кривая 3) и линейной (кривая 4)

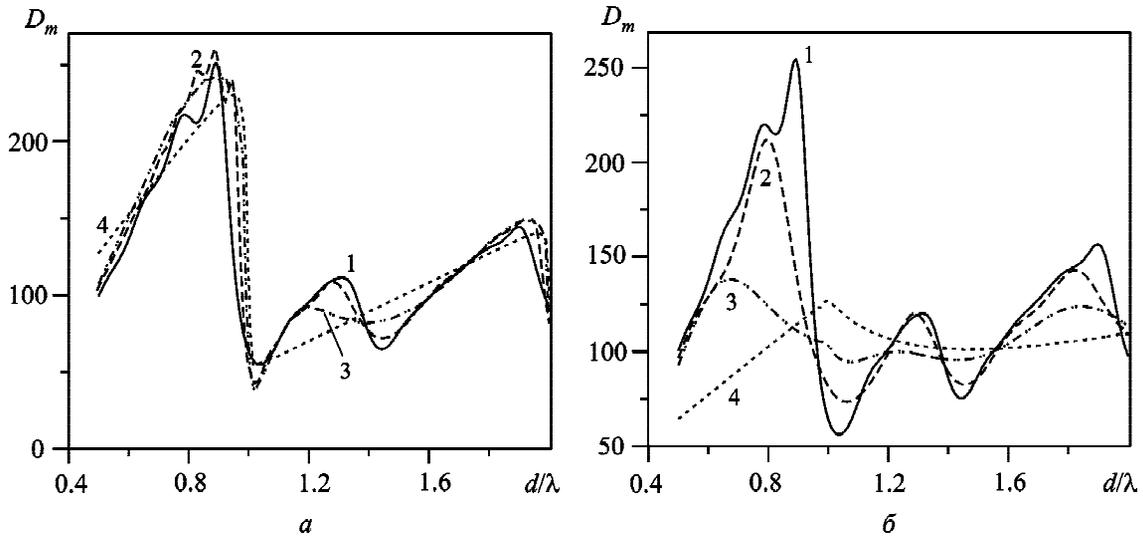


Рис. 3. Зависимости КНД от расстояния между элементами – диполями Герца антенной решетки из 64 излучателей с квадратной формой апертуры (кривые 1), прямоугольной (кривые 2), квазилинейной (кривые 3) и линейной (кривые 4): *a* – диполи перпендикулярны оси решетки; *б* – диполи параллельны оси решетки

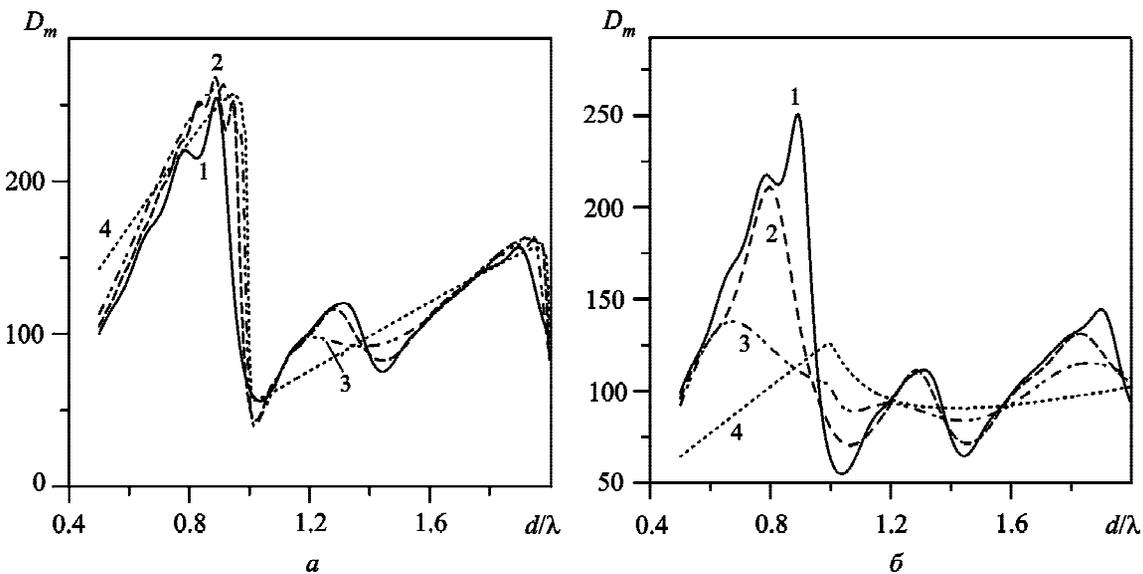


Рис. 4. Зависимости КНД от расстояния между элементами – полуволновыми вибраторами антенной решетки из 64 излучателей с квадратной формой апертуры (кривые 1), прямоугольной (кривые 2), квазилинейной (кривые 3) и линейной (кривые 4): *a* – вибраторы параллельны оси *OX*; *б* – вибраторы параллельны оси *OY*

не завуалированные направленностью излучателей – элементов решетки.

В случае линейной решетки изотропных излучателей ($D_{m0} = 1$) при расстоянии между излучателями $d = \lambda/2$ КНД, рассчитанный по формуле (1) как при $N = 64$ (рис. 1), так и при других N (см. табл. 1), в точности равен числу излучателей $D_m = N$ и для малоэлементных, и для многоэлементных решеток. Этот результат

представляется прямым следствием принципа суперпозиции в электродинамике: КНД решетки излучателей равен сумме КНД отдельных излучателей. Отметим, что из экстраполяции по приближенной формуле (3) для КНД линейной непрерывной антенны следует, что для линейной решетки в рассматриваемом случае при $d = \lambda/2$ КНД равен $N - 1$. Очевидно, что в случае малоэлементных решеток погрешность расчета

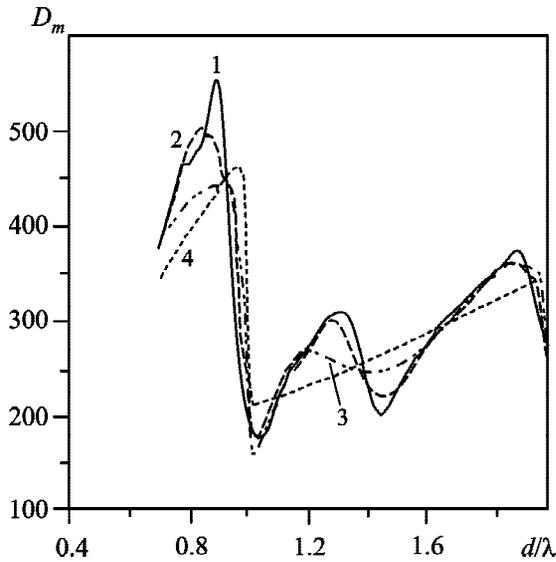


Рис. 5. Зависимости КНД от расстояния между элементами — прямоугольными волноводами антенной решетки из 64 излучателей с разной формой апертуры: квадратной (кривая 1), прямоугольной (кривая 2), квазилинейной (кривая 3) и линейной (кривая 4)

КНД по приближенной формуле недопустимо большая.

При увеличении d/λ до определенного предела, различного в зависимости от заданного числа излучателей и разных их типов, КНД антенны увеличивается по примерно линейному закону и достигает максимально возможного значения. Крутизна этой зависимости тем больше, чем выше направленность излучателя — элемента антенной решетки. В табл. 1 приведены значения КНД D_m линейных решеток изотропных излучателей при расстоянии между ними $d = \lambda/2$, максимально достижимые значения КНД D_m^{\max} и оптимальные расстояния $(d/\lambda)_{\max}$ между излучателями, обеспечивающие эти мак-

симумы КНД, выигрыш в КНД оптимизированной по его максимуму линейной решетки по сравнению с КНД классической решетки при $d = \lambda/2$, т. е. D_m^{\max}/D_m , минимальные возможные значения КНД D_m^{\min} линейной антенной решетки при $d > \lambda$ и расстояния между излучателями $(d/\lambda)_{\min}$, при которых имеют место минимумы КНД, а также отношение минимально возможного значения КНД к максимальному D_m^{\max}/D_m^{\min} при изменении числа излучателей N от двух до 100.

Проанализируем далее предельно достижимые КНД линейных решеток изотропных излучателей. Рассчитывались зависимости КНД от d/λ при изменении числа излучателей от 2 до 100, а отношение d/λ изменялось от 0.5 до 2. Из результатов расчетов, представленных в табл. 1, видно, что максимум максимум КНД решетки с фиксированным числом излучателей превышает КНД “классической” решетки при $d = 0.5\lambda$ в 1.27 раза при $N = 2$. Это значение увеличивается по мере увеличения числа излучателей сначала быстро (например, до 1.67 при $N = 10$), а затем весьма медленно (от 1.72 при $N = 15$ до 1.88 при $N = 100$). Заметим, что ширина главного лепестка ДН решеток, оптимизированных по максимуму максимуму КНД, уменьшается по сравнению с КНД “классических” решеток при $d = 0.5\lambda$. Следовательно, чувствительность, а также угловая и пространственная разрешающая способность РЭС с подобными оптимизированными по максимуму КНД антенными системами улучшается. Заметим, что при малом числе излучателей максимум максимум КНД имеет место при расстояниях между излучателями, существенно меньшими длины волны. В частности, при $N = 2$ расстояние $d_{\text{opt}} = 0.72\lambda$, а при

Таблица 1. Характеристики направленности линейной решетки изотропных излучателей

N	2	4	8	10	15	20	30	40	50	100
D_m	2	4	8	10	15	20	30	40	50	100
D_m^{\max}	2.55	5.96	13.11	16.71	25.77	84.85	53.7	72.67	91.7	188
$(d/\lambda)_{\max}$	0.72	0.83	0.9	0.92	0.94	0.95	0.94	0.95	0.96	0.97
D_m^{\max}/D_m	1.27	1.44	1.63	1.67	1.718	1.74	1.79	1.817	1.83	1.88
D_m^{\min}	1.77	3.22	6.04	7.42	10.8	14.36	21.29	28.23	35.1	69.05
$(d/\lambda)_{\min}$	1.23	1.015	1.09	1.07	1.05	1.04	1.024	1.024	1.03	1.017
D_m^{\max}/D_m^{\min}	1.44	1.86	2.17	2.25	2.38	2.43	2.52	2.57	2.61	2.72

$N = 10$ значение $d_{opt} = 0.92\lambda$. При увеличении числа излучателей до 100 расстояние $d_{opt} = 0.97\lambda$. Объясняется это явление тем, что при малом числе излучателей ДН широкие и увеличение уровня боковых лепестков в плоскости XOY , в которой лежит решетка, относительно слабо влияет на КНД. При большом числе излучателей увеличение количества и уровней дальних боковых лепестков и нарастающий уровень дифракционных лепестков сильно уменьшают КНД. При дальнейшем увеличении расстояния между излучателями КНД имеет убывающий осциллирующий характер и асимптотически стремится к КНД, равному числу излучателей. Осцилляции КНД в этом случае, как и его незначительные осцилляции в области максимума максимуму КНД, объясняются сложным нелинейным характером изменения ДН в области реальных углов $\pm 90^\circ$ при увеличении расстояния между излучателями – элементами антенной решетки. В частности, когда в направлениях $\theta = \pm 90^\circ$, т. е. в плоскости, в которой расположена решетка, уровень боковых лепестков высокий или полностью сформировались дифракционные лепестки, КНД антенны уменьшается, если же в этих направлениях амплитуда поля минимальная, то КНД антенны увеличивается.

Зависимость КНД антенны от частоты имеет физический смысл передаточной функции антенны по мощности. Следовательно, в пределах от электрически малых расстояний между излучателями до расстояний около $0.90\lambda \div 0.99\lambda$, при которых имеет место максимум максимуму КНД, передаточная функция антенны линейная (с весьма малыми осцилляциями на пике КНД) и мало искажает форму и спектр сигнала в этом частотном диапазоне. На более высоких частотах, когда расстояние между излучателями достигает 1.23λ для решетки из двух изотропных излучателей, 1.04λ для линейки из 20 излучателей и 1.02λ для линейки из 100 излучателей, КНД уменьшается соответственно в 1.44, 2.43 и 2.72

раза, другими словами, во столько раз уменьшается чувствительность приемной РЭС или мощность излучения антенны в направлении главного максимума ее ДН. Это явление “ослепления” нефазированных антенных решеток на высоких частотах, когда $d > \lambda$, аналогичное явлению “ослепления” фазированных антенных решеток при сканировании в широком секторе углов, необходимо учитывать на практике, особенно в радиоастрономии, подповерхностной радиолокации, широкополосных телекоммуникационных системах и в других областях и системах, в которых используются широкополосные и сверхширокополосные сигналы.

Рассмотрим далее влияние характеристик направленности излучателя – элемента антенной решетки на КНД линейных решеток при изменении расстояния между излучателями. Результаты расчетов зависимости КНД от d/λ для линейной решетки из 64 излучателей Гюйгенса представлены на рис. 2, а значения КНД при разном числе излучателей – в табл. 2. Отметим, что качественно характер зависимости КНД от d/λ , рассчитанной при других количествах излучателей, такой же и не зависит от числа излучателей. При этом главные особенности этой зависимости – увеличение КНД по линейному закону примерно в два раза при увеличении d/λ от 0.5 до ≈ 0.9 и достижение его максимально возможного значения – качественно повторяют особенности такой же зависимости в случае линейной решетки из 64 изотропных излучателей (рис. 1). Однако значение КНД примерно на 30 % меньше ожидаемого согласно известной формуле $D_m = D_{mo} N$.

Рассмотрим далее характеристики направленности решеток полуволновых вибраторов. Как было отмечено выше, КНД линейных решеток вибраторов, оси которых перпендикулярны оси решетки, существенно больше КНД линейных решеток такого же количества вибраторов, оси которых параллельны оси решет-

Таблица 2. Характеристики направленности линейной решетки излучателей Гюйгенса

N	2	4	8	10	15	20	30	40	50	100
D_m	5.58	10.92	21.58	26.92	40.25	53.584	80.25	106.92	133.58	266.93
D_m^{\max}	7.198	16.474	35.897	45.743	70.492	95.55	145.29	196.64	248.001	506.32
$(d/\lambda)_{\max}$	0.74	0.84	0.907	0.92	0.948	0.957	0.945	0.957	0.96	0.97
D_m^{\max}/D_m	1.29	1.5	1.66	1.69	1.75	1.78	1.81	1.84	1.86	1.897

ки (рис. 3, *a*, *б*). Легко видеть, что это отличие объясняется отличием ДН таких решеток: ДН в случае, когда оси вибраторов и решетки совпадают, осесимметричная, в другом случае ее осевая симметрия нарушается. Значения КНД линейной решетки вибраторов, перпендикулярных оси решетки, при изменении числа излучателей от 2 до 100 представлены в табл. 3. Результаты расчетов КНД линейной решетки вибраторов, параллельных оси решетки, представлены в табл. 4.

Из полученных результатов расчетов видно, что при расстоянии между излучателями $d = 0.5\lambda$ КНД в первом случае больше произведения КНД единичного излучателя и КНД такой же решетки изотропных излучателей, во втором – меньше. Такая же закономерность имеет место и в отношении зависимости максимума максимумума КНД от числа излучателей.

Заметим, что максимум максимумума КНД линейных решеток вибраторов в первом случае достигается при меньших расстояниях между излучателями. Отношение максимума максимумума КНД к его минимуму минимуму при $d > \lambda$, т. е. эффект “ослепления” нефазируемой антенной решетки, также в первом случае значительно больше, чем во втором (см. рис. 3, *a*, *б*).

В случае решеток коротких вибраторных антенн, описываемых математической моделью диполей Герца, качественный характер зависи-

мости КНД и от расстояния между излучателями (рис. 4, *a*, *б*), и от их числа такой же, как и в случае аналогичных решеток полуволновых вибраторов. Количественно же значения КНД в случае решеток диполей Герца незначительно меньше. Эти особенности объясняются незначительным отличием КНД диполя Герца и полуволнового вибратора.

На рис. 5 представлены зависимости КНД антенных решеток из 64 излучателей в виде открытых концов прямоугольных волноводов от расстояния между излучателями.

В линейных и апертурных решетках с раскрытием прямоугольной формы излучатели расположены так, что широкие стенки волноводов параллельны оси линейной решетки или большим сторонам раскрытия. Из рис. 5 видно, что в случае излучателя – элемента решетки с большей направленностью отношение D_{\max}/D_{\min} в зависимости КНД от расстояния между излучателями или от рабочей частоты антенны меньше, чем в случае решеток диполей Герца, излучателей Гюйгенса и полуволновых вибраторов.

Рассмотрим далее характеристики направленности апертурных антенных решеток с излучающим раскрытием квадратной и прямоугольной формы. Из рис. 1–5 видно, что при фиксированном числе излучателей любого типа при расстоянии между ними $d = 0.5\lambda$ КНД линейного излучателя меньше КНД апертурного излучателя с любой – квадратной или прямоуголь-

Таблица 3. Характеристики направленности линейной решетки полуволновых вибраторов, оси которых перпендикулярны оси решетки

N	2	4	8	10	15	20	30	40	50	100
D_m	3.96	8.36	17.28	21.743	32.916	44.099	66.46	88.83	111.196	223.04
D_m^{\max}	5.022	12.27	27.088	34.516	54.021	74.218	114.63	156.082	197.832	408.761
$(d/\lambda)_{\max}$	0.668	0.81	0.898	0.917	0.886	0.91	0.94	0.932	0.945	0.95
D_m^{\max}/D_m	1.27	1.47	1.57	1.59	1.64	1.68	1.72	1.76	1.78	1.83

Таблица 4. Характеристики направленности линейной решетки полуволновых вибраторов, оси которых параллельны оси решетки

N	2	4	8	10	15	20	30	40	50	100
D_m	2.41	4.384	8.368	10.366	15.363	20.359	30.358	40.357	50.356	100.36
D_m^{\max}	3.481	7.304	15.121	19.061	28.954	38.876	58.77	78.695	98.64	198.452
$(d/\lambda)_{\max}$	0.973	0.982	0.99	0.992	0.995	0.995	0.998	0.998	0.998	0.998
D_m^{\max}/D_m	1.44	1.66	1.81	1.84	1.88	1.91	1.94	1.95	1.96	1.98

ной – формой раскрыва, кроме случаев вибраторных излучателей и диполей Герца, расположенных перпендикулярно оси линейной решетки (рис. 3, а и 4, а). При увеличении d/λ КНД апертурных решеток увеличивается по весьма близкому к линейному закону до некоторого максимально возможного значения для каждого варианта формы раскрыва апертурной решетки. При этом до определенных значений d/λ зависимость КНД от d/λ определяется площадью излучающего раскрыва и одинакова для любой формы апертуры решетки. Однако максимум максимум КНД достигается при разных отношениях d/λ . Значение его максимально в случае раскрыва квадратной формы и тем меньше, чем ближе форма раскрыва к линейной.

В табл. 5 приведены результаты расчетов характеристик направленности апертурных решеток изотропных излучателей с раскрывом квадратной формы при изменении числа излучателей от 10×10 до 100×100 . Из приведенных данных следует, что полученная зависимость $D_m(N)$ для квадратной решетки изотропных излучателей при расстоянии между ними $d = 0.5\lambda$ хорошо аппроксимируется функцией

$$D_m = 1.5N^2. \quad (6)$$

Ошибка аппроксимации δ (последняя строка в табл. 5) не превышает 4 % при 10000 излучателей. Максимум максимум КНД квадратной нефазированной решетки из 100 излучателей в 2.34 раза больше КНД такой решетки при $d = 0.5\lambda$, а из 10000 излучателей – больше в 3.16 раза. Расстояние между излучателями, при котором достигается максимум максимум КНД, меньше при меньшем числе излучателей, равно 0.82λ для решетки из 10×10 излучателей и увеличивается до 0.94 для решетки из 100×100 излучателей.

При увеличении расстояния между излучателями до значений больше длины волны КНД квадратной решетки значительно уменьшается, причем тем больше, чем больше число излучателей в решетке. Заметим, что этот эффект “ослепления” нефазированной решетки тем меньше, чем ближе форма ее раскрыва к линейной. При дальнейшем увеличении d/λ КНД квадратной и прямоугольной решеток имеют убывающий нерегулярно осциллирующий характер, существенно отличающийся для разных форм излучающего раскрыва.

Таким образом, эффект “ослепления” антенных решеток на частотах, при которых расстояние между излучателями больше длины волны, проявляется тем сильнее, чем ближе форма раскрыва антенны к квадратной. Детальные расчеты показали, что искажения формы и спектра сигнала за счет нелинейности зависимости КНД антенных решеток от частоты возможны и в более низкочастотном диапазоне в области значений d/λ , при которых имеет место максимум максимум КНД. На рис. 6 приведены зависимости от d/λ КНД антенной решетки из 100×100 излучателей для трех вариантов излучателей: изотропных (кривая 1), излучателей Гюйгенса (кривая 2) и открытых концов прямоугольных волноводов (кривая 3). Из рисунка видно, что мелкомасштабные высокочастотные осцилляции имеют место в диапазоне длин волн от $0.93d$ до $1.03d$. Очевидно, что при изучении тонкой структуры спектров сигналов с помощью антенных решеток особенно больших и гигантских электрических размеров эти эффекты необходимо учитывать.

Результаты расчетов КНД апертурных решеток с прямоугольной и квадратной формой раскрыва при изменении числа излучателей в широких пределах и расстоянии между ними $d = 0.5\lambda$ приведены в табл. 6. Для каждого

Таблица 5. Характеристики направленности квадратных решеток изотропных излучателей

N	10×10	20×20	30×30	40×40	50×50	100×100
D_m	149	610	1385	2474	3878	15606
D_m^{\max}	349	1580	3843	7114	12273	49093
$(d/\lambda)_{\max}$	0.82	0.86	0.9	0.904	0.924	0.94
D_m^{\max}/D_m	2.34	2.6	2.77	2.87	3.15	3.16
$\delta, \%$	+1	-1.6	-2.5	-3	-3.3	-3.9

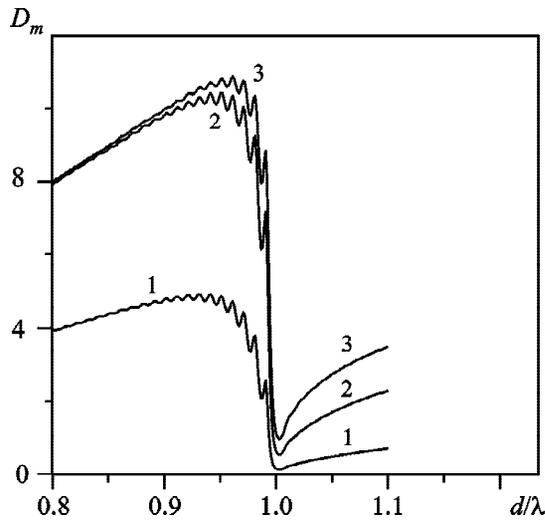


Рис. 6. Зависимость КНД квадратной решетки из 100×100 излучателей от расстояния между ними: кривая 1 – изотропные излучатели; кривая 2 – излучатели Гюйенса; кривая 3 – открытые концы прямоугольных волноводов

числа $N \times N$ излучателей в соответствующей ячейке таблицы приведены два значения КНД: рассчитанное по формуле (1) (вверху) и по формуле аппроксимации (6) (внизу). Приведенный массив данных может быть использован для эскизного проектирования антенных реше-

ток при изменении числа излучателей в широких пределах.

4. Выводы

1. Разработано математическое обеспечение для расчета ДН во всем пространстве наблюдения и КНД линейных и плоских антенных решеток. Тип излучателя – элемента решетки задается без каких-либо ограничений его математической моделью. На число излучателей, расстояния между ними, размеры и форму излучающего раскрыва и амплитудно-фазовое распределение в раскрыве также не накладывается принципиальных ограничений.

2. На основании многочисленных расчетов и теоретического анализа ДН во всем пространстве наблюдения и КНД эквидистантных антенных решеток из излучателей разных типов при изменении их числа в широких пределах установлено, что при расстоянии между излучателями в решетках, не превышающем $0.6\lambda \div 0.9\lambda$, характеристики направленности дискретных и непрерывных антенн и их передаточные функции в форме зависимости КНД от частоты практически не отличаются. При больших расстояниях между излучателями

Таблица 6. Значения КНД плоской решетки изотропных излучателей в зависимости от числа излучателей $N \times N$, рассчитанные по формуле (1) и формуле (6)

N	2	4	6	8	10	15	20	25
2	5.11 6	10.72 12	16.4 18	22.15 24	27.9 30	42.24 45	56.62 60	70.98 75
4	10.7 12	22.4 24	34.12 36	45.9 48	57.7 60	87.13 90	116.96 120	146.57 150
6	16.4 18	34.12 36	52 54	69.96 72	88 90	132.39 135	178.15 180	222.99 225
8	22.15 24	45.9 48	69.96 72	94.1 96	118.3 120	177.93 180	239.65 240	299.67 300
10	27.9 30	57.7 60	88 90	118.3 120	148.7 150	223.55 225	301.21 300	376.64 375
15	42.24 45	87.13 90	132.39 135	177.92 180	223.55 225	335.53 337.5	452.23 450	565 562.5
20	56.62 60	116.96 120	178.15 180	239.66 240	301.21 300	452.23 450	610 600	762.09 750
25	70.98 75	146.57 150	222.99 225	299.67 300	376.64 375	564.99 562	762.09 750	967.2 937.5

монотонный характер зависимости КНД решетки от частоты нарушается и становится нерегулярным, осциллирующим. Этим антенные решетки принципиально отличаются от непрерывных зеркальных, рупорных, линзовых апертурных остронаправленных антенн. Максимальное изменение КНД в зависимости от длины рабочей волны антенной решетки имеет место при расстоянии между излучателями, примерно равном длине волны.

3. Известные до настоящего времени приближенные формулы для расчета КНД антенных решеток не описывают физические явления, приводящие к изменению ДН и уменьшению КНД в диапазоне частот при расстояниях между излучателями, больших длины волны. Показано, что в этом случае имеет место явление “ослепления” нефазированных антенных решеток в высокочастотной области широкополосных и сверхширокополосных сигналов, излучаемых и/или принимаемых антенной решеткой, за счет значительного уменьшения КНД. Эффект “ослепления” наиболее сильно проявляется в больших и гигантских фазированных и нефазированных антенных решетках, в частности в радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами [11].

4. Рассчитанные зависимости КНД от числа излучателей, представленные в таблицах, могут служить справочным материалом для более точного по сравнению с известными математическими моделями определения КНД антенных решеток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горобец Н. Н., Горобец Ю. Н. Компьютерный анализ характеристик направленности антенных решеток // Все-союзная НТК “Компьютерные методы исследования проблем теории и техники передачи дискретных сигналов по радиоканалам”: Тез. докладов. – М.: Радио и связь, 1990. – С. 47–48.
2. Фельд Я. Н., Бененсон Л. С. Антенны сантиметровых и дециметровых волн. Часть 1. – М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1955. – 208 с.
3. Шубарин Ю. В. Антенны сверхвысоких частот. – Харьков: Изд. Харьковского гос. университета, 1960. – 283 с.
4. Минкович Б. М., Яковлев В. П. Теория синтеза антенн. – М.: Сов. радио, 1969. – 296 с.
5. Марков Г. Т., Сазонов Д. М. Антенны. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.
6. Горобец Н. Н., Булгакова А. А. Характеристики направленности разреженных антенных решеток // Вісник Харківського національного ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Серія: Радіофізика та електроніка. – 2008. – № 834, Вип. 13. – С. 89–94.
7. Мотлохов В. В. Антенные устройства. – М.: МО СССР, 1990. – 420 с.
8. Коноваленко А. А., Токарский П. Л., Ерин С. Н. Эффективная поверхность и характеристики направленности антенной решетки в режиме приема сверхширокополосных сигналов // Радиофизика и радиоастрономия. – 2013. – Т. 18, № 3. – С. 257–264.
9. Чаплин А. Ф. Анализ и синтез антенных решеток. – Львов: Вища школа, 1987. – 180 с.
10. Hansen R. C. Phased Array Antennas. 2nd ed. – New York: Wiley, 2009. – 547 p.
11. Шульга В. М., Литвиненко Л. Н., Мышенко В. В. Некоторые этапы развития радиоастрономических наблюдений в миллиметровом диапазоне длин волн в Радиоастрономическом институте НАН Украины // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, Спец. вып. – С. S45–S53.

REFERENCES

1. GOROBETS, N. N. and GOROBETS, Yu. N., 1990. Computer analysis of the directional characteristics of antenna arrays. In: *Computer methods of research of problems of the theory and technology of transmission of digital signals by radio*: Conf Proc. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., pp. 47–48 (in Russian).
2. FELD, Y. N. and BENENSON, L. S., 1955. *Centimeter-wavelength and microwave antennas*. Moscow: N. E. Zhukovsky Academy Publ. (in Russian).
3. SHUBARIN, Y. V., 1960. *Microwave Antennas*. Kharkiv, Ukraine: Kharkiv State University Publ. (in Russian).
4. MINKOVICH, B. M. and YAKOVLEV, V. P., 1969. *Theory of Antenna Synthesis*. Moscow: Sovetskoe Radio Publ. (in Russian).
5. MARKOV, G. T. and SAZONOV, D. M., 1975. *Antennas*. Moscow: Energiya Publ. (in Russian).
6. GOROBETS, N. N. and BULGAKOVA, A. A., 2008. Sparse antenna array patterns. *The Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University, series Radiophysics and Electronics*. vol. 834, is. 13, pp. 89–94 (in Russian).
7. MOTLOHOV, V. V., 1990. *Antenna facilities*. Moscow: USSR Ministry of Defense Publ. (in Russian).
8. KONOVALENKO, A. A., TOKARSKY, P. L. and YERIN, S. N., 2013. Effective Area and Directional Patterns of Antenna Array Operating in Ultra Wideband Signals Receiving Mode. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 18, no. 3, pp. 257–264 (in Russian).
9. CHAPLIN, A. F., 1987. *Analysis and synthesis of antenna arrays*. Lviv, Ukrain: Vishcha Shkola Publ. (in Russian).
10. HANSEN, R. C., 2009. *Phased Array Antennas. 2nd ed.* New York: Wiley.
11. SHULGA, V. M., LYTVYNNENKO, L. M. and MYSHENKO, V. V., 2005. Some Development Stages in the Millimeter Wavelength Radioastronomy Observations at

the Institute of Radio Astronomy NAS-Ukraine. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 10, special is., pp. S45–S53 (in Russian).

A. A. Bulgakova, N. N. Gorobets, V. A. Katrich, and V. A. Lyashchenko

V. N. Kazarin Kharkiv National University,
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

DIRECTIVITY OF ANTENNA ARRAYS

Purpose: Theoretical investigation of directive gains of linear and planar antenna arrays depending on the distance between radiators and wavelength.

Design/methodology/approach: Computing methods in applied mathematics in MathCad were used to calculate the twofold integrals of the radiation pattern over power throughout the whole space observed, defining the directivity in the most general terms. Patterns of radiators, i. e. elements of antenna arrays, are specified by mathematical models. The calculation accounts for the subintegral fast oscillating function.

Findings: Calculations and analysis of a directive gain according to the number of radiators and distances between them in fractions of wavelength are made. It is shown that at the ratio of distance between radiators to wave-length being $d/\lambda = 0.5$ the directivity of array of isotropic radiators is $1.5N^2$, N – number of radiators. When increasing the d/λ to $0.65 \div 0.97$ the directivity increases according to the law close to the linear one up to the maximum possible value for the specified number of radiators. With the increase of d/λ to the values greater than one, the directivity is significantly reduced (the “blinding” effect of non-phased antenna arrays) and its dependence with the growth of d/λ is decaying and oscillating in character. By that, the transfer function of antenna arrays has some vital difference from the transfer function of continuous antennas.

Conclusions: Antenna arrays distort the waveform and spectrum of radiated and received signals as a result of irregular changes of their directivity depending on wavelength. The detected “blinding” effect of non-phased antenna arrays of large electrical dimensions must be taken into account in wideband and superwideband radio-electronics systems, especially in radio astronomy, telecommunications systems and superwideband radar.

Keywords: antenna arrays, directivity, pattern, weakly directed radiators, numerical analysis

Г. О. Булгакова, М. М. Горобець, В. О. Катрич, В. О. Лященко

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

КОЕФІЦІЄНТ СПРЯМОВАНОЇ ДІЇ АНТЕННИХ РЕШТОК

Предмет та мета роботи: Теоретично досліджуються коефіцієнти спрямованої дії (КСД) лінійних та плоских антенних решіток залежно від відстані між випромінювачами та довжини хвилі.

Методи і методологія: Обчислювальними методами прикладної математики у середовищі MathCad розраховано двократні інтеграли від діаграми спрямованості за потужністю у всьому просторі спостереження, які визначають КСД у загальному вигляді. Діаграми спрямованості випромінювачів – елементів антенних решіток задаються математичними моделями. У розрахунках враховується, що підінтегральна функція є швидкоосцилюючою.

Результати: Виконано розрахунки та аналіз залежності КСД від числа випромінювачів та відстані між ними у частках довжини хвилі. Показано, що при відношенні відстані між випромінювачами до довжини хвилі $d/\lambda = 0.5$ КСД решітки ізотропних випромінювачів дорівнює $1.5N^2$, N – кількість випромінювачів в антенній решітці. Зі зростанням цього відношення до $0.65 \div 0.97$ КСД збільшується за близьким до лінійного законом до максимально можливого значення для заданого числа випромінювачів. Зі зростанням d/λ до значень понад одиницю КСД значно зменшується (ефект “осліплення” нефазованих антенних решіток) і його залежність з ростом d/λ має згасаючий осцилюючий характер. Цим передаточна функція антенних решіток принципово відрізняється від передаточних функцій безперервних антен.

Висновок: Антенні решітки спотворюють форму та спектр сигналів, що випромінюються або приймаються, внаслідок нерегулярного характеру зміни їх КСД залежно від довжини хвилі. Виявлений ефект “осліплення” нефазованих антенних решіток великих електричних розмірів необхідно враховувати в широкосмугових та надширокосмугових радіоелектронних системах, особливо в радіоастрономії, телекомунікаційних системах та надширокосмуговій радіолокації.

Ключові слова: антенні решітки, коефіцієнт спрямованої дії, діаграма спрямованості, слабо спрямовані випромінювачі, числовий аналіз

Статья поступила в редакцию 05.07.2016