

ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ РАЗРЕЖЕННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Н.Н. Горобец, А.А. Булгакова

Харьковский национальный университет им.В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61077, Украина

E-mail: Nikolay. N. Gorobets@univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 17 сентября 2008г.

Рассчитаны диаграммы направленности, коэффициент направленного действия и коэффициент рассеяния эквидистантной линейной решетки и проанализированы их зависимости от числа излучателей и расстояния между ними. Показано, что для каждого числа излучателей есть оптимальная длина антенны, равная $L \approx 0,9(N-1)$ при которой достигается максимум КНД. При большей длине антенны или повышении рабочей частоты КНД изменяется по осциллирующим закономерностям с тем большим отличием максимумов и минимумов, чем больше число излучателей. При малом числе излучателей ($N \leq 8$) характеристики направленности решетки выше, чем у непрерывной антенны той же электрической длины, а при $N \geq 16$ их характеристики практически совпадают

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электромагнитные волны, антенны, антенные решетки, характеристики направленности

Антенные решетки являются альтернативой антеннам оптического и акустического типов при создании остронаправленных излучающих устройств для радиоэлектронных систем различного функционального назначения. При этом зеркальные, линзовые и рупорные антенны, т.е. основные варианты остронаправленных антенн оптического и акустического типа, имеют большие объемы, что часто неприемлемо для многих практических приложений. Антенные же решетки при тех же характеристиках направленности – коэффициенте усиления, ширине главного лепестка диаграммы направленности и уровне боковых лепестков – имеют плоскую или конформную конструкцию, что особенно важно для радиоэлектронных систем летательных аппаратов и транспортных средств.

В настоящее время теория и техника антенных решеток, особенно фазированных – обеспечивающих мгновенное сканирование пространства, разработаны достаточно хорошо. Однако случай сильно разреженных решеток, когда расстояние между излучателями превышает значительно длину волны, изучен мало. Это объясняется тем хорошо известным обстоятельством, что при больших расстояниях между излучателями, равных или больших длины волны, в диаграмме направленности антенной решетки появляются дифракционные лепестки, что приводит не только к катастрофическому ухудшению характеристик направленности, но и к потере однозначности определения направления прихода электромагнитной волны. Однако, задача анализа характеристик излучения сильно разреженных антенных решеток на практике возникает автоматически при решении задачи обеспечения межсистемной электромагнитной совместимости радиоэлектронных систем в высокочастотной области спектра электромагнитных волн. Кроме того, в разреженных антенных решетках синфазных излучателей уменьшается ширина главного лепестка диаграммы направленности, что часто важно на практике. В частности, этот эффект используют в радиоастрономии для увеличения разрешающей способности в радиоинтерферометрах со сверхдлинной переменной базой. Отметим также, что в разреженных антенных решетках существенно уменьшаются эффекты взаимного влияния излучателей друг на друга, что позволяет улучшить характеристики антенны.

Целью настоящей статьи является систематическое изучение зависимости характеристик направленности излучения сильно разреженных антенных решеток изотропных и слабонаправленных излучателей от их числа и расстояния между ними.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Излучатели – элементы антенной решетки расположим вдоль оси x , расстояние между излучателями примем равным d , а угол θ направления на точку наблюдения будем отсчитывать от оси z , ориентированной в направлении внешней нормали к решетке. Предположим также, что все излучатели в решетке возбуждаются синфазно токами или полями одинаковой амплитуды. Отметим, что последнее условие позволяет изучить предельные достижимые значения ширины главного лепестка диаграммы направленности (ДН) решетки и ее коэффициент направленного действия. Ограничимся рассмотрением

характеристик направленности линейной антенной решетки, что позволит проанализировать физические аспекты влияния расстояния между излучателями на исследуемые явления и характеристики без уменьшения общности решения задачи.

Диаграмма направленности в плоскости линейной решетки при указанных предположениях имеет простой вид:

$$F(\theta) = \frac{\sin(0.5 N k d \sin \theta)}{N \sin(0.5 k d \sin \theta)} \quad (1)$$

где N - число излучателей в линейке; $k = 2\pi/\lambda$ - волновое число, λ - длина волны в свободном пространстве.

Коэффициент направленного действия (КНД) определяется интегрированием ДН по мощности по всему пространству наблюдения. В рассматриваемом случае линейных решеток выражение для КНД упрощается:

$$D'_m = 1 / \int_0^{\pi/2} |F(\theta)|^2 \cos \theta d\theta \quad (2)$$

Интегрирование в (2) по углам наблюдения только в плоскости решетки позволяет проанализировать влияние всех изменений ДН на все характеристики антенны при изменении расстояния между излучателями и их числа.

В случае использования в качестве элементов решетки направленных излучателей ДН в (1) и (2) необходимо умножить на ДН излучателя в плоскости линейки.

Так как в простейшем рассматриваемом случае линейной решетки изотропных излучателей с постоянным амплитудным и фазовым распределением источников поля выражение для КНД в (2) в явном виде не интегрируется, чем и объясняется отсутствие в литературе подобных исследований до настоящего времени, анализ всех закономерностей будем проводить по результатам компьютерных вычислений. Конкретно проанализируем влияние числа излучателей и расстояния между ними на форму ДН, ширину главного лепестка и КНД, а также на коэффициент рассеяния.

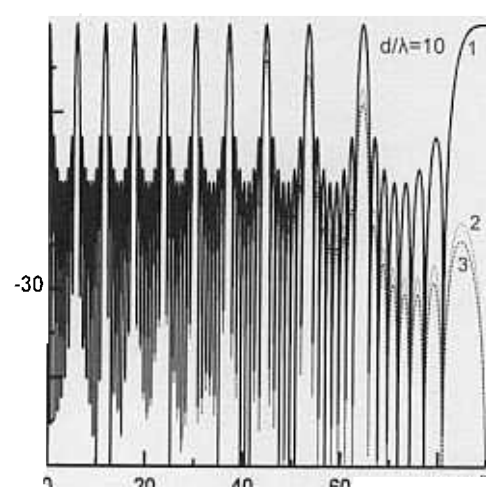
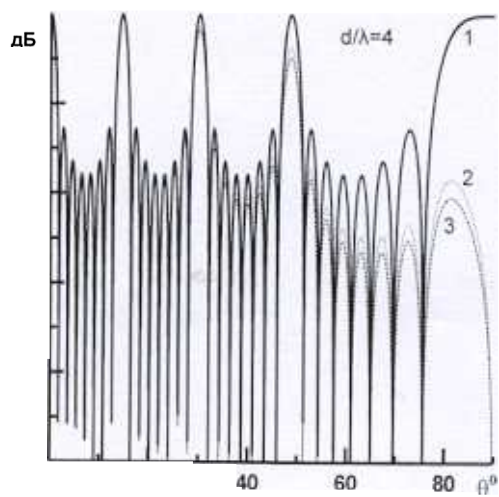
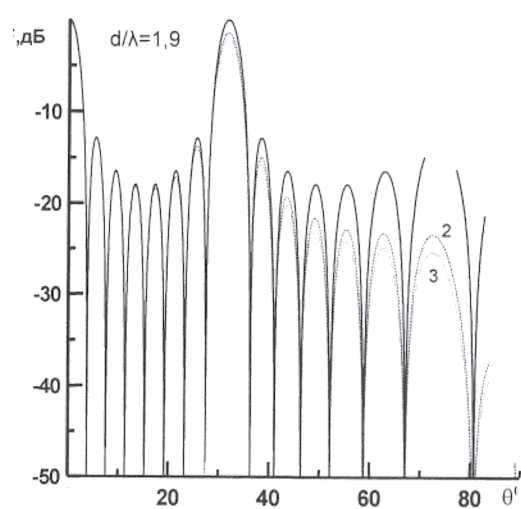
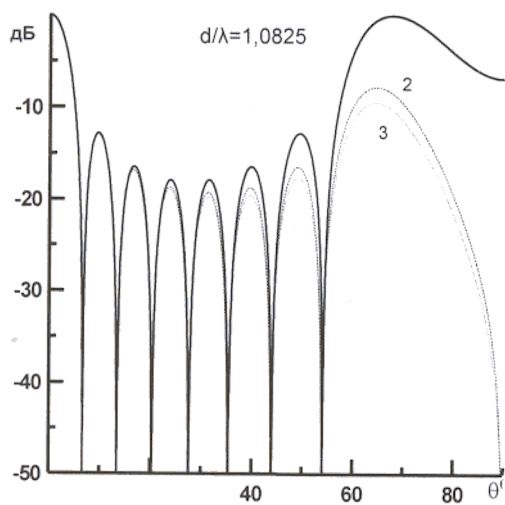
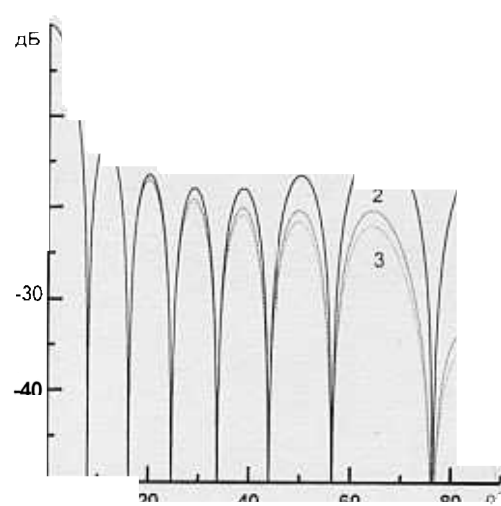
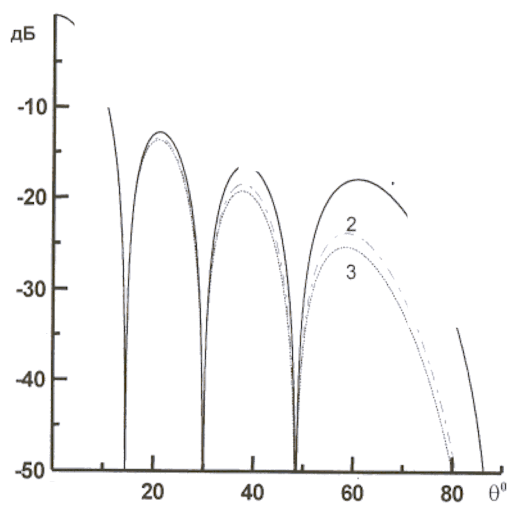
Отметим, что поскольку в разреженных антенных решетках эффекты взаимного влияния излучателей пренебрежимо малы, для обеспечения общности анализа в дальнейшем эти эффекты не учитываются.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

В расчетах число излучателей выбиралось из условия $N=2^n$, где $n=1,2,3...$ Этот выбор связан с тем, что решетки с таким числом излучателей на практике удобно реализовать в наиболее широкополосном варианте с параллельным возбуждением элементов с помощью делителей на два в фидерном тракте. Кроме того, при $N=2$ легко анализируется предельный случай решетки с минимальным числом излучателей.

Динамику изменения диаграммы направленности разреженной антенной решетки при увеличении d/λ иллюстрирует рис.1, на котором представлены расчетные ДН решетки из 8 изотропных излучателей при изменении расстояния между ними от 0.5 до 10 длин волн (кривая 1). Видно и возникновение дифракционных лепестков, и уменьшение ширины главного лепестка ДН по мере увеличения d/λ . Видно также, что в секторе углов между соседними дифракционными лепестками число боковых лепестков на два меньше числа излучателей. Эта особенность имеет место при любом числе излучателей.

На этом же рисунке показаны ДН линейных решеток диполей Герца (кривая 2) и резонансных полуволновых вибраторов, расположенных в плоскости линейной решетки (кривая 3). Из этих данных видны известные возможности уменьшения уровня дифракционных и боковых лепестков ДН за счет направленных свойств излучателя – элемента решетки. Естественно, что направленные свойства излучателей сильнее влияют на дальнее боковое излучение и практически не влияют на главный лепесток ДН.



Дирекция
луча

при

длине

имеет

до

волновым

интервалом

рабочей

На рис. 2 представлена зависимость парциального КНД, рассчитанного по формуле (2), от электрической длины линейной решетки изотропных излучателей, число которых изменялось от 2 до 32. Здесь же представлена такая же зависимость для линейной непрерывной антенны с постоянным амплитудным и фазовым распределением источников поля, ДН которой описывается функцией:

$$F(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{kL}{2} \sin \theta\right)}{\frac{kL}{2} \sin \theta} \quad (3)$$

КНД рассчитывался численным интегрированием ДН (3) в соответствии с формулой (2). Из рисунка видно, что при любом числе излучателей увеличение d/λ от 0.5 и более приводит к росту КНД. Максимум максимум его достигается при $d/\lambda \approx 0.9$ и далее КНД с увеличением d/λ и, следовательно, увеличением L/λ , изменяется по осциллирующим закономерностям. Последующие максимумы КНД достигаются при увеличении d/λ на целое число длин волн. Минимум минимум КНД имеет место при $d/\lambda \approx 1.1$; а последующие минимумы несколько большей величины имеют место при увеличении d/λ также на целое число длин волн.

Различие максимальных и минимальных значений КНД при увеличении расстояния между излучателями тем больше, чем больше число излучателей.

Поясним эти результаты более подробно. Хорошо известно, что КНД увеличивается при уменьшении ширины главного лепестка ДН и уменьшается при увеличении уровня боковых лепестков. Следовательно, очередной максимум КНД имеет место, когда очередной дифракционный лепесток в реальном секторе углов $\theta \in [-90^\circ, 90^\circ]$ не достигает максимальной величины. Это видно из рис. 1б и 1г, соответствующих этим случаям. Минимум КНД имеет место в тех случаях, когда дифракционный лепесток достигает максимального уровня.

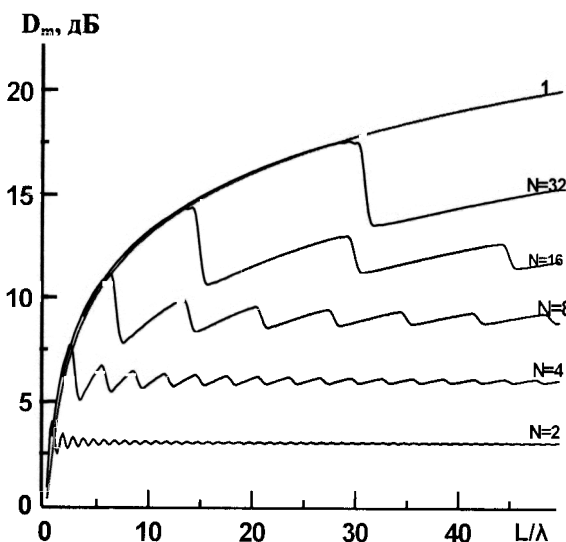


Рис.2. Зависимость КНД линейной решетки изотропных излучателей от ее электрической длины
(1 – непрерывная антенна)

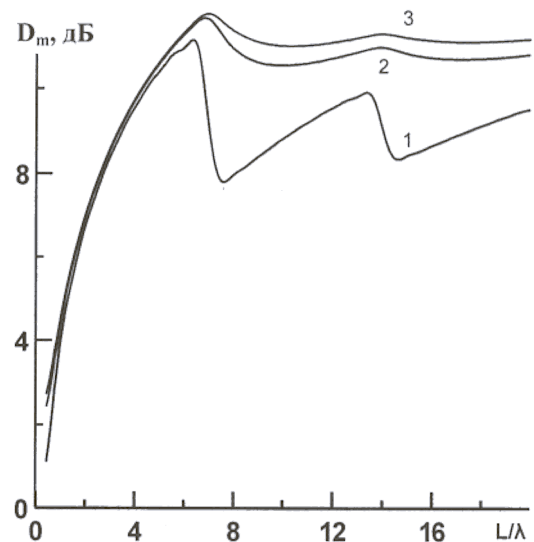


Рис.3. Влияние направленности излучателя на КНД разреженной решетки

Из рис. 2 видно также, что при малом числе излучателей $N < 8$ максимум максимум КНД разреженной антенной решетки даже выше, чем КНД непрерывной линейной антенны. При числе излучателей $N \geq 8$, как показали расчеты, максимальный КНД разреженной решетки совпадает с КНД непрерывной антенны.

Рассмотрим далее влияние направленности излучателя – элемента решетки на ее парциальный КНД. На рис. 3 представлены зависимости КНД от L/λ решетки 8 ненаправленных излучателей (кривая 1), диполей Герца (кривая 2) и полуволновых вибраторов (кривая 3). Видно, что использование направленных излучателей позволяет:

- увеличить оптимальное расстояние между излучателями в решетке, обеспечивающей максимальное значение КНД;
- уменьшить глубину осцилляций КНД решеток, у которых расстояние между излучателями больше оптимального.

Все эти эффекты являются следствием того, что в решетках направленных излучателей уменьшается уровень боковых и дифракционных лепестков, причем тем сильнее, чем больше направленность излучателя.

Зависимость ширины главного лепестка ДН по уровням -3; -10 и -50дБ разреженной антенной решетки из 8 изотропных излучателей от расстояния между ними представлена на рис. 4.

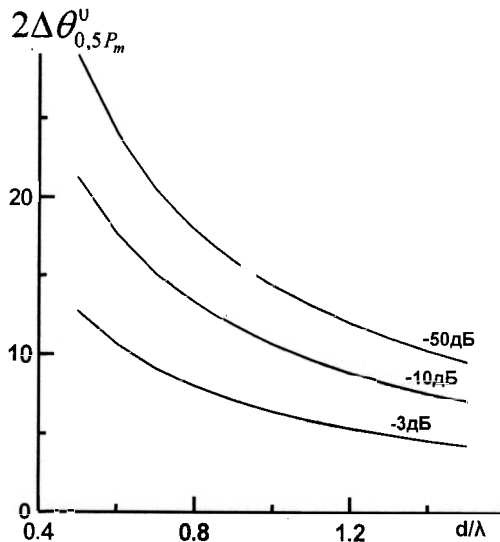


Рис. 4. Зависимость ширины главного лепестка ДН от расстояния между излучателями ($N=8$)

$$2\Delta\theta_{0.5P_m} = \frac{51}{d/\lambda} \quad (4)$$

Из анализа результатов расчетов следует, что при малом числе излучателей ширина ДН $2\Delta\theta_{0.5P_m}$ разреженной антенной решетки меньше, чем линейной непрерывной антенны. Так, в случае $N=4$ при $d/\lambda = 0.5$ коэффициент в числителе в (4) равен 39.4; при $d/\lambda = 0.9$ он равен 39.0; и при $d/\lambda = 1.1$ он равен 37.7. При увеличении числа излучателей до $N \geq 16$ этот коэффициент практически такой же, как и непрерывной антенны.

Важной характеристикой антенных систем является коэффициент рассеяния. Обычно он определяется как отношение мощности излучения антенны через боковые лепестки ДН ко всей мощности излучения антенны. Через ДН антенны он вычисляется по формуле:

$$\beta_0 = \frac{\iint_{\Omega_{бок}} |F(\theta, \varphi)|^2 \cos \theta d\theta d\varphi}{\iint_{4\pi} |F(\theta, \varphi)|^2 \cos \theta d\theta d\varphi} \quad (5)$$

Для практики представляет интерес коэффициент рассеяния не по первому нулю ДН, как в формуле (5), а по сектору углов вне ширины главного лепестка по половинной мощности (β_{-3dB}) и по уровню -10дБ (β_{-10dB}).

На рис. 5 представлены зависимости этих коэффициентов рассеяния разреженной антенной решетки 8 изотропных излучателей от расстояния между ними. В расчетах за направление первого нуля ДН взят угол, при котором уровень поля относительно главного максимума равен -50дБ.

Из рисунка видно, что при $d/\lambda = 0.5$ коэффициент рассеяния β_0 меньше 0.09. При увеличении d/λ до 0.9 коэффициент рассеяния увеличивается довольно медленно до величины 0.16. При дальнейшем увеличении d/λ возникновение дифракционных лепестков приводит к увеличению β_0 в 7 и более раз. Аналогично зависят от d/λ и коэффициенты рассеяния по уровням -10дБ и -3дБ.

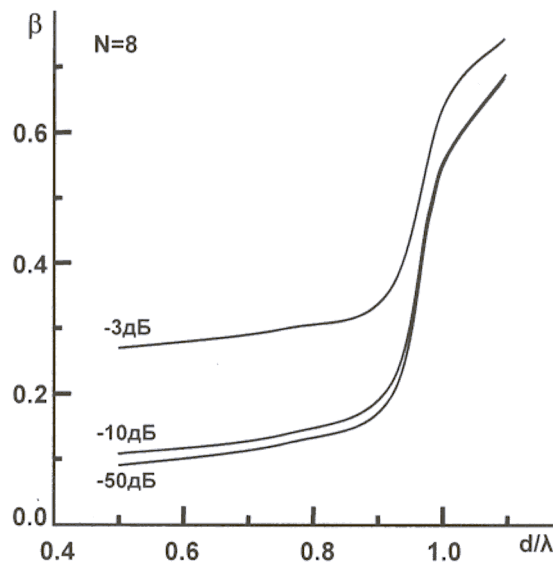


Рис.5. Зависимость коэффициента рассеяния разреженной антенной решетки от расстояния между излучателями ($N=8$)

ВЫВОДЫ

Разработан алгоритм и компьютерные программы для расчёта диаграмм направленности, ширины главного лепестка, КНД и коэффициента рассеяния линейных эквидистантных антенных решеток при произвольных достаточно больших расстояниях между излучателями. Проведен компьютерный анализ этих характеристик и показано, что КНД разреженных антенных решеток достигает максимума максимуму при $d \approx 0.9\lambda$. При дальнейшем увеличении d имеют место максимумы несколько меньшей величины при увеличении d от 0.9λ на целое число длин волн, первый минимум имеет место при $d \approx 1.1\lambda$, а последующие минимумы незначительно большей величины имеют место при увеличении d также на целое число длин волн.

Показано, что для каждого числа излучателей в решетке $N \geq 2$, есть оптимальная электрическая длина антенны, при которой обеспечивается максимум максимум КНД. эта длина примерно равна $L/\lambda \approx 0.9(N-1)$.

Расчеты показали также, что при малом ($N \leq 8$) числе излучателей характеристики направленности разреженной антенной решетки выше, чем непрерывной антенны той же электрической длины, при большем числе излучателей ($N \geq 10$) характеристики непрерывной и дискретной антенны практически совпадают.