

# ЛИНЕЙНЫЕ ФАЗИРОВАННЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ

МАКСИМ КАВЕРИН, инженер

В статье рассматривается принцип работы фазированных антенных решеток. Описываются основные характеристики линейных антенных массивов.

## ФОРМИРОВАНИЕ ЛУЧА

Рассмотрим принцип работы антенной решетки. В упрощенном виде он представлен на рисунке 1. За каждым антенным элементом устанавливается временная задержка, после чего все четыре сигнала суммируются.

На рисунке 1 слева видно, что временная задержка соответствует разнице во времени между моментами, когда сигнал приходит на каждый антенный элемент. В этом случае сигналы поступают синфазно в точку объединения. На выходе сумматора сигнал имеет большую амплитуду.

Справа показана ситуация, когда задержка та же самая, но сигнальная волна направлена перпендикулярно антенным элементам. Поскольку задержка не совпадает с фазой сигналов, на выходе сумматора сигнал значительно ослаблен.

В фазированной решетке временная задержка представляет собой количественную разницу, необходимую для формирования луча. Ее можно также смоделировать путем смещения фазы. Рассмотрим влияние временной задержки.

На рисунке 2 показана антенная решетка со смещением фазы. За опорное направление ( $\theta = 0^\circ$ ) принята ось, перпендикулярная антенне. Направо отсчитываются положительные углы, налево – отрицательные. Чтобы наглядно увидеть сдвиг фазы  $\Delta\Phi$ , следует начертить прямоугольный треугольник между элементами массива (см. рис. 3).

Пусть сигнал поступает под углом  $\theta$  относительно опорного направления. Дополняющий угол (т.е. угол между сигналом и горизонтом) обозначен как  $\phi$ . Зная его, легко рассчитать разность длин путей прохождения  $L = d \sin(\theta)$ . Требуемая задержка должна быть равна времени, затрачиваемому на прохождение этого расстояния.

Если расстояние  $L$  выражено через длину волны, задержка соответствует доле фазы:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi d \sin\theta}{\lambda} \quad (1)$$

Если расстояние между элементами равно половине длины волны, то уравнение упрощается:

$$\Delta\Phi = \pi \sin\theta \quad (2)$$

Рассмотрим пример. Пусть имеются два антенных элемента, расположенных на расстоянии 15 мм друг от друга. Если поступает сигнал 10,6 ГГц под углом  $30^\circ$ , то оптимальный сдвиг фаз вычисляется следующим образом:

$$\theta = 30^\circ = 0,52 \text{ рад};$$

$$\lambda = c/f = (3 \cdot 10^8 \text{ м/с})/10,6 \text{ ГГц} = 0,0283 \text{ м};$$

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= (2\pi d \sin\theta)/\lambda = \\ &= 2\pi \cdot 0,015 \cdot \sin(0,52)/0,0283 \text{ м} = \\ &= 1,67 \text{ рад} = 95^\circ. \end{aligned}$$

Таким образом, при падении волны под углом  $\theta = 30^\circ$  и фазовом сдвиге  $95^\circ$  сигналы суммируются. Усиление антенны в этом направлении увеличивается.

На рисунке 4 показано, как меняется фазовый сдвиг при разных направлениях сигнала  $\theta$ . Видно, что при  $d > \lambda/2$  нет такого значения фазового сдвига, которое обеспечило бы полное смещение луча.

## РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ МАССИВ

Полученные выше уравнения применимы для массива из двух элементов. Рассмотрим линейный массив из  $N$  элементов. Расстояние между ними может быть разным, но, как правило, его делают одинаковым. Для простоты рассмотрим именно эту ситуацию (расстояние  $d$  на рисунке 5).

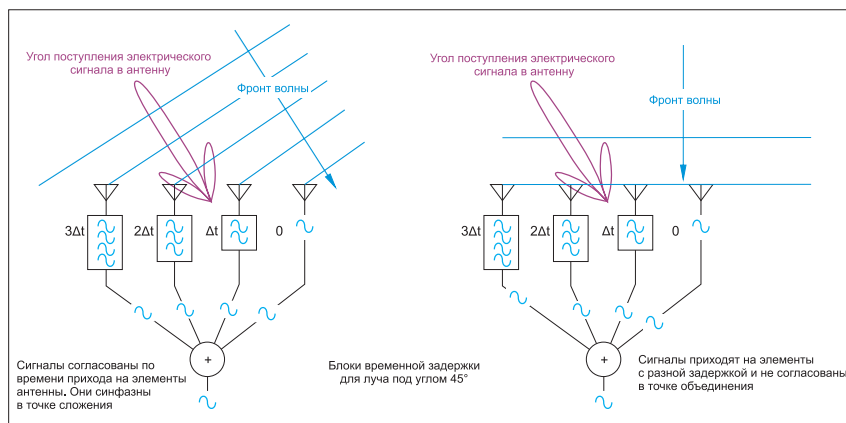


Рис. 1. Прием сигнала с двух направлений четырьмя антенными элементами

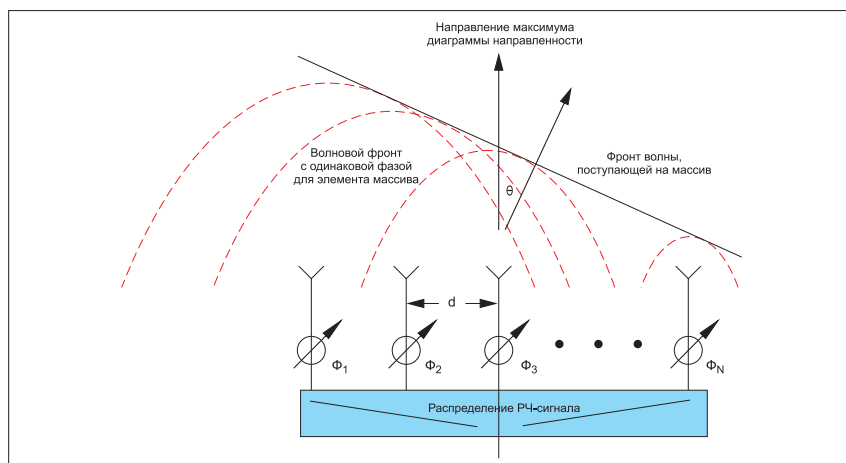


Рис. 2. Фазированный массив с фазовращателями

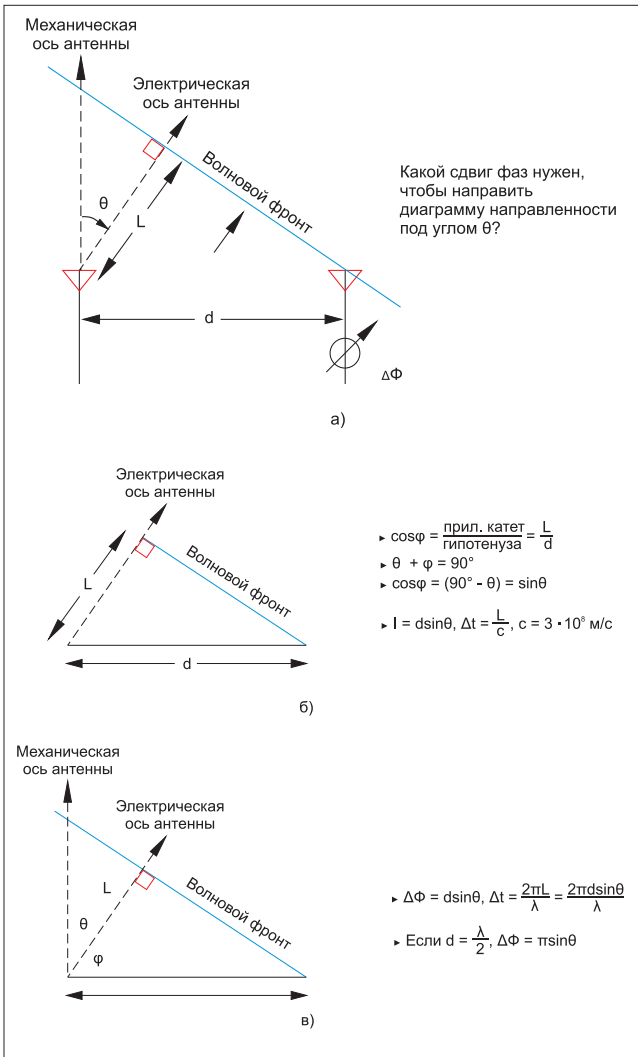


Рис. 3. Принцип появления разности фаз  $\Delta\Phi$  между антенными элементами

Ранее мы получили уравнения для  $N = 2$ . Теперь примем  $N = 10\,000$ . Из рисунка б видно, что на каждый элемент сигнал падает под разными углами, поскольку он выходит из точечного источника.

Если источник сигнала расположен близко, приходится учитывать эти различия. В противном случае пути прохождения сигнала различаются очень мало, и разницей можно пренебречь (см. рис. 7). Таким образом, все углы одинаковы, до каждого соседнего элемента сигнал проходит большее расстояние на величину  $L = d \sin \theta$ . Математически эта ситуация описывается намного проще, и уравнения для массива из двух элементов применимы для любого количества расположенных на одном расстоянии друг от друга элементов.

Источник считается расположенным далеко, когда он удален более чем на  $2D^2/\lambda$ , где  $D$  – диаметр антенны. В рассматриваемом случае для линейного однородного массива он равен  $d(N-1)$ . При использовании малой антенны или низкой частоты сигнала это расстояние мало. Для больших антенн или высокочастотных сигналов оно может составлять километры. В этом случае затруднительно проводить испытания и калибровку массива.

**ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ**

Основными параметрами антенны являются коэффициент усиления, направленность, раскрыт. Идеальная изотропная антенна излучает одинаково во всех направлениях. Направленность антенны есть соотношение между максимальной измеренной мощностью  $P_{MAX}$  в одном направлении к средней

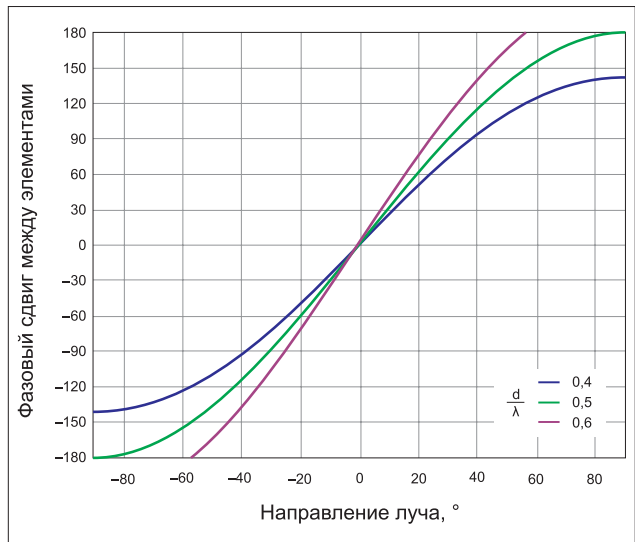


Рис. 4. Зависимость фазового сдвига  $\Delta\Phi$  между элементами от направления луча  $\theta$  для трех значений  $d/\lambda$

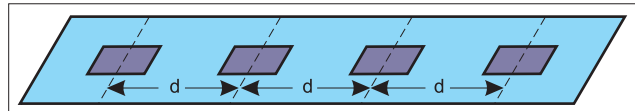


Рис. 5. Линейный массив с равномерно распределенными элементами ( $N = 4$ )

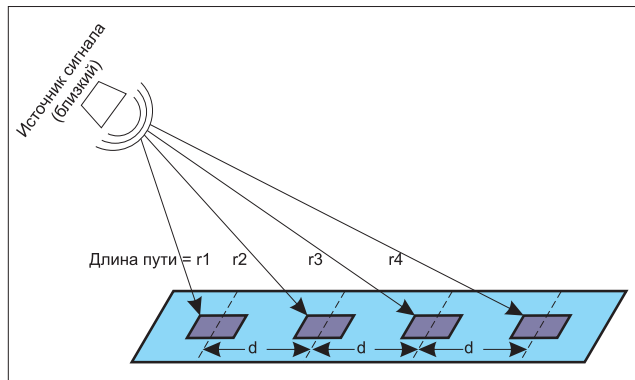


Рис. 6. Источник сигнала расположен близко к антенному массиву. Сигнал приходит на элементы под разными углами

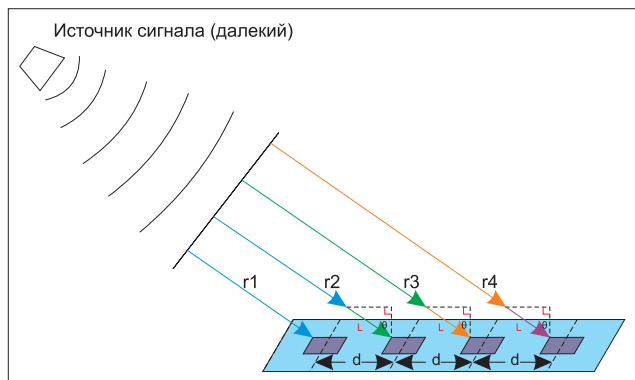


Рис. 7. Источник сигнала расположен далеко от антенного массива. Сигналы приходят на элементы параллельно

мощности  $P_{AV}$ , излученной во всех направлениях. Когда выделенное направление не задано, направленность рассчитывается из соотношения (3):

$$D = \frac{P_{MAX}}{P_{AV}} \quad (3)$$

Направленность удобно использовать для сравнения антенн, поскольку она характеризует их способность фокусировать передаваемую энергию. Коэффициент усиления  $G$

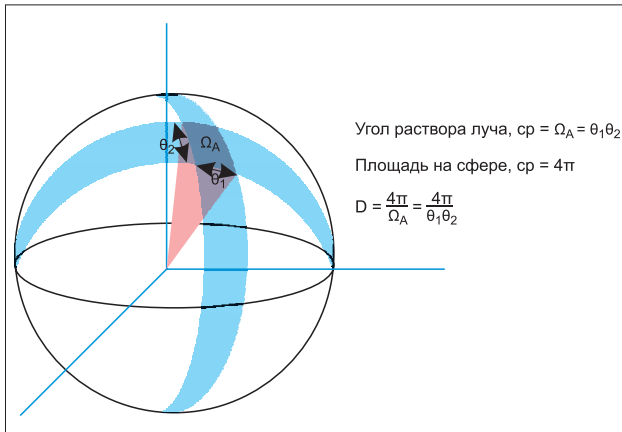


Рис. 8. Объемное представление области на сфере

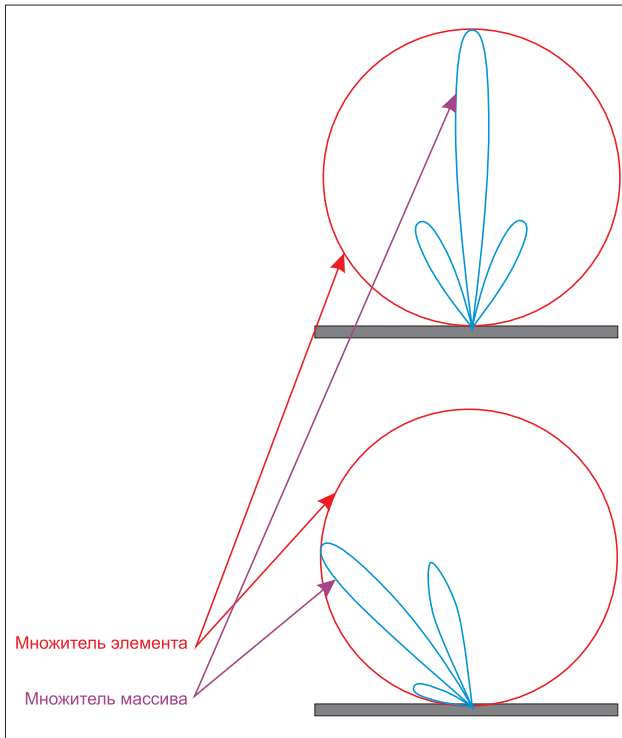


Рис. 9. Коэффициент усиления антенны определяется множителем элемента и множителем массива

очень похож на направленность  $D$ , однако в нем учтены потери антенны:

$$G = kD, \quad k = \frac{P_{\text{RAD}}}{P_{\text{IN}}}, \quad (4)$$

где  $P_{\text{RAD}}$  – общая излучаемая мощность;  $P_{\text{IN}}$  – мощность, поступающая в антенну;  $k$  – коэффициент потерь.

Рассмотрим излучение антенны в пространстве (см. рис. 8). Общая поверхность сферы равна  $4\pi r^2$ . Участок сферы, ограниченный телесным углом, измеряется встерадианах (ср). Полная поверхность сферы содержит телесный угол  $4\pi$  ср. Таким образом, плотность мощности для изотропной антенны составляет (5):

$$\frac{P_{\text{RAD}}}{4\pi r^2}, \quad \text{Вт/м}^2. \quad (5)$$

В радарных системах два угловых направления для сфер обычно называются азимутом и углом места (возвышения). Раствор луча описывается с помощью углов  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , которые образуют участок  $\Omega_A$  на сфере. Угол  $\Omega$

измеряется встерадианах и примерно равен произведению  $\theta_1\theta_2$ . Следовательно, направленность можно выразить следующим образом:

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} \approx \frac{4\pi}{\theta_1\theta_2}. \quad (6)$$

Перейдем к рассмотрению последнего параметра – раскрыва. Он представляет собой эффективную область для приема электромагнитных волн и зависит от длины волны. Для изотропной антенны раскрыв равен (7):

$$A_{\text{isotropic}} = \frac{\lambda^2}{4\pi}. \quad (7)$$

Коэффициент усиления рассчитывается относительно изотропного излучения. Действительный раскрыв антенны рассчитывается по формуле (8):

$$A_E = \frac{G\lambda^2}{4\pi}. \quad (8)$$

Таким образом, коэффициент усиления можно рассматривать как функцию угла, в котором производится излучение, и по этому показателю можно судить об эффективности (или потерях) антенны.

#### МНОЖИТЕЛЬ РЕШЕТКИ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО МАССИВА

Определим оптимальный промежуток времени (или фазу), необходимый для обеспечения максимальной направленности. Для этого понадобится общее усиление антенны. Оно определяется двумя составляющими (см. рис. 9): усилением каждого элемента в отдельности  $G_E$  и множителем решетки  $G_A$  (9).

$$G(\theta) = G_E(\theta) + G_A(\theta). \quad (9)$$

Коэффициент усиления элемента антенны определяется его геометрическими и конструктивными параметрами, т.е. его нельзя изменить во время работы. Для простоты допустим, что все элементы имеют одинаковую конструкцию.

Множитель решетки рассчитывается по ее геометрическим параметрам (в нашем случае – по расстоянию  $d$ ) и параметрам луча (амплитуда, фаза).

Поскольку мы хотим проследить изменение коэффициента усиления, рассмотрим нормализованный множитель решетки, приведенный к единичному коэффициенту:

$$AF[\theta] = \frac{\sin\left(\frac{N\pi d}{\lambda} [\sin(\theta) - \sin(\theta_0)]\right)}{N \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} [\sin(\theta) - \sin(\theta_0)]\right)}, \quad (10)$$

где  $\theta_0$  – угол падения луча.

Мы уже показали (см. уравнение (1)), что угол падения луча зависит от фазового сдвига между элементами массива  $\Delta\Phi$ . Отсюда следует уравнение (11):

$$AF[\theta, \Delta\Phi] = \frac{\sin\left(N\left[\frac{\pi d}{\lambda} \sin(\theta) - \frac{\Delta\Phi}{2}\right]\right)}{N \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin(\theta) - \frac{\Delta\Phi}{2}\right)}. \quad (11)$$

Принятые допущения:

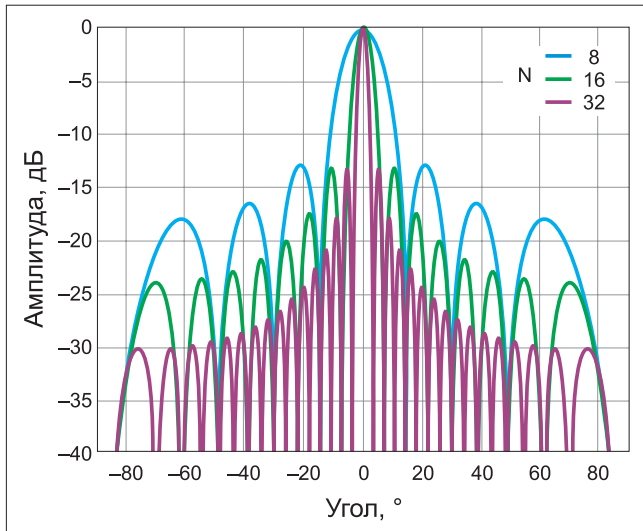


Рис. 10. Нормированный множитель массива в направлении оси антенны при расстоянии между элементами  $d = \lambda/2$  и их количестве 8, 16 и 32

- элементы расположены на одном и том же расстоянии друг от друга;
- между элементами фазовый сдвиг один и тот же;
- амплитуда сигнала на всех элементах одинакова.

На рисунках 10–11 показано графическое представление множителя решетки для антенных массивов разных типов. Видно, что независимо от типа массива первый боковой лепесток имеет амплитуду  $-13$  дБн. Чем больше элементов в массиве, тем уже луч и тем больше нулей на диаграмме направленности. Наконец, чем дальше от направления максимума диаграммы направленности, тем шире луч.

### ШИРИНА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

Диаграмма направленности антенны – это графическое изображение распределения уровней мощности, излучаемой антенной на одинаковом расстоянии от нее в разных направлениях какой-либо плоскости, проходящей через центр или ось антенны. Ширину диаграммы направленности измеряют на уровне половины мощности (см. уровень HPBW на рисунке 12) либо между нулями на главном лепестке (FNBW). Для определения уровня половинной мощности необходимо спуститься на 3 дБ от максимума и измерить угловое расстояние.

Математически он рассчитывается с помощью уравнения (11). Уровень половины мощности 3 дБ соответствует значению  $1/\sqrt{2}$ . Примем  $\theta = 0^\circ$ ,  $N = 8$  и  $d = \lambda/2$ :

$$1/\sqrt{2} = \frac{\sin\left(8\left[\frac{\pi\lambda}{2\lambda}\sin(\theta) - \frac{\Delta\Phi}{2}\right]\right)}{8\sin\left(\frac{\pi\lambda}{2\lambda}\sin(\theta) - \frac{\Delta\Phi}{2}\right)}. \quad (13)$$

Разрешая его относительно  $\Delta\Phi$ , получаем 0,35 рад. Подставляя это значение в (1) получаем:

$$0,35 = \frac{2\pi\lambda\sin\theta}{2\lambda}.$$

Отсюда  $\theta = 0,11$  рад =  $6,4^\circ$ .

Мы нашли угол, при котором излучение на 3 дБ меньше максимального. Поскольку таких точек две, это значение необходимо удвоить для получения углового расстояния (HPBW= $12,8^\circ$ ).

Повторим процедуру для множителя решетки, равного нулю, получаем, что расстояние между нулями FNBW =  $28,5^\circ$ .

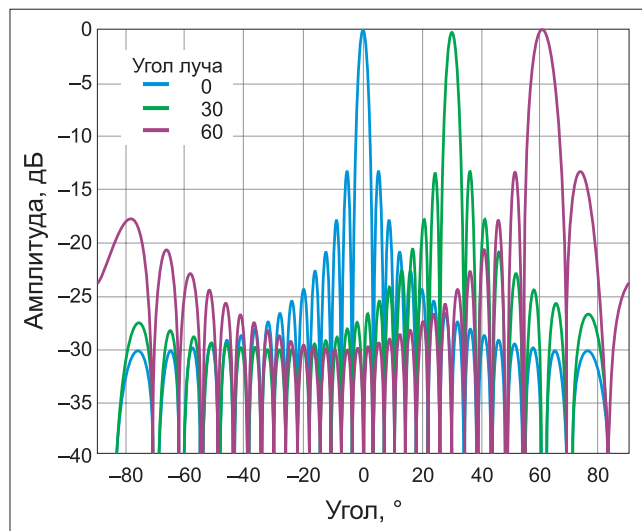


Рис. 11. Нормированный множитель линейного массива из 32 элементов, удаленных на расстояние  $d = \lambda/2$

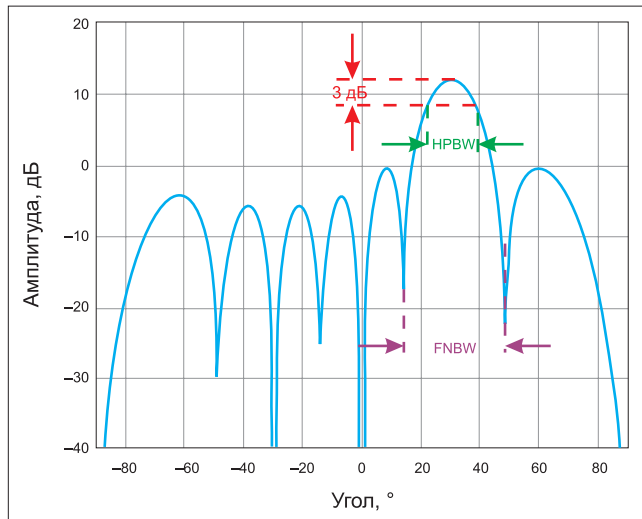


Рис. 12. Определение ширины диаграммы направленности для линейного массива  $N = 8$ ,  $d = \lambda/2$ ,  $\theta = 30^\circ$

Для равномерных массивов можно воспользоваться приближением:

$$\theta_B = \frac{0,886\lambda}{Nd\cos\theta}.$$

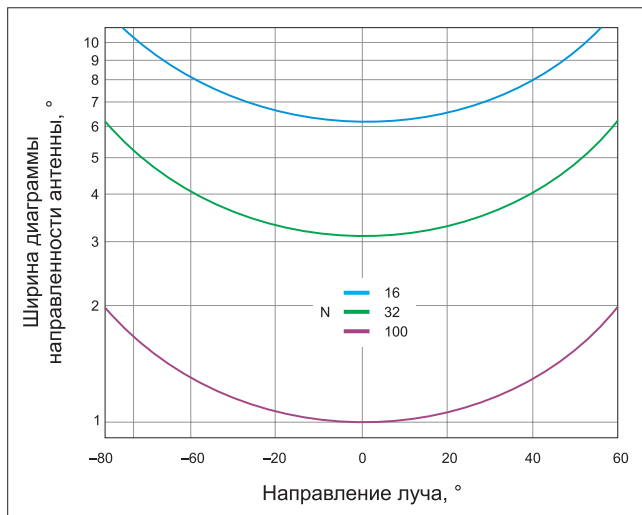


Рис. 13. Зависимость ширины диаграммы направленности антенны от угла падения луча при расстоянии между элементами  $\lambda/2$  и их количестве 16, 32 и 100

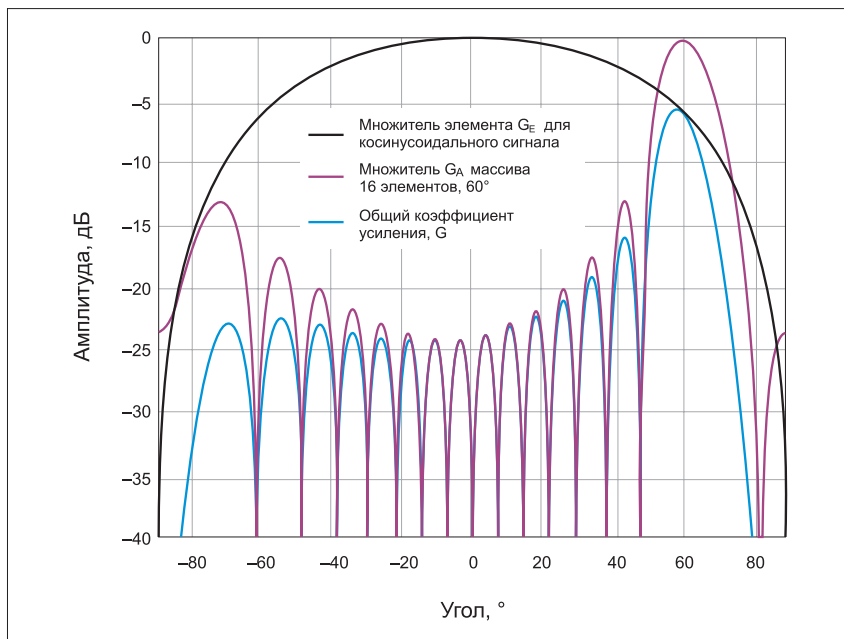


Рис. 14. Направленность антенны в полярных координатах при  $N = 8$ ,  $d = \lambda/2$ ,  $\theta = 30^\circ$

На рисунке 13 приведены значения углов раствора диаграммы направленности в зависимости от направления луча для нескольких антенных массивов, элементы которых удалены на расстояние  $\lambda/2$ . Для обеспечения точности  $1^\circ$

требуются 100 элементов. Если она необходима в обоих направлениях, азимута и угла возвышения, потребуется массив из 10 000 элементов. Точность  $1^\circ$  достигается только в опорном направлении при практически идеальных условиях. Для

обеспечения точности  $1^\circ$  в разных направлениях используется больше элементов.

В настоящее время наиболее распространены массивы из 1024 элементов по 32 ряда. Точность раствора луча составляет  $4^\circ$  вблизи опорного направления. Матрицы из 256 элементов обеспечивают точность  $10^\circ$ , что приемлемо для большинства приложений.

Заметим, что при удалении на  $60^\circ$  от опорного направления раствор диаграммы направленности удваивается.

Характеристики антенны можно представить в декартовых или полярных координатах.

На рисунке 14 приведена та же характеристика, что на рисунке 12, но в полярных координатах.

Заметим, что большинство антенных массивов могут работать и на прием, и на передачу. Все представленные выше диаграммы применимы для обоих направлений передачи сигнала.

### ВЫВОДЫ

Мы рассмотрели основные параметры антенны, обсудили факторы, влияющие на раскрытие антенны, сравнили графическое представление диаграммы направленности в декартовых и полярных координатах.  $\square$