

Определение коэффициента направленного действия рупорной антенны

Описание лабораторной работы

Цель работы: Нахождение коэффициента направленного действия пирамидальной рупорной антенны с помощью так называемого зеркального метода (метод Парселла).

1. Теоритическая часть

Антенна — устройство, предназначенное для излучения или приема волн (в нашем случае — электромагнитных). Одна из важнейших функций антенны состоит в формировании излучения с определенными направленными свойствами. Основными характеристиками направленности антенны являются диаграмма направленности (ДН) по амплитуде или по мощности, коэффициент направленного действия (КНД) и коэффициент усиления (КУ). Напомним, как вводятся эти характеристики.

Диаграмма направленности по амплитуде есть угловое распределение амплитуды поля излучения, т.е. зависимость этой амплитуды от полярного θ и азимутального φ углов при фиксированном расстоянии r от антенны. *Диаграмма направленности по мощности* есть угловое распределение мощности излучения в единицу телесного угла $P(\theta, \varphi) = r^2 S_r(r, \theta, \varphi)$, где S_r — радиальная компонента вектора Пойнтинга на достаточно большом расстоянии r от антенны. Представляется удобным использование (наряду с абсолютной) нормированной диаграммы направленности $F(\theta, \varphi) = P(\theta, \varphi)/P(\theta_m, \varphi_m)$, где $P(\theta_m, \varphi_m)$ — мощность, излучаемая в единичный телесный угол в направлении главного максимума (θ_m, φ_m) диаграммы направленности. Диаграмму направленности изображают графически либо в виде «объемной», рельефной картины, где по каждому угловому направлению (θ, φ) откладывается величина, пропорциональная амплитуде поля излучения или излучаемой мощности (см. рис. 1а), либо с помощью плоской развертки отдельных, чаще всего двух ортогональных сечений, проходящих через направление главного максимума и векторы электрического \mathbf{E} и магнитного \mathbf{H} полей (см. рис.1б). Поскольку основная часть мощности, излучаемой направленной антенной, сосредоточена, как правило, в главном лепестке, то весьма показательной представляется его угловая ширина, определяемая обычно по уровню половинной мощности $(\Delta\theta_{0,5})$, а иногда и по нулевому (или минимальному) значению $(\Delta\theta_0)$, как показано на рис.1б. Диаграмма направленности антенны, характерный размер l излучающей апертуры которой порядка или больше длины излучаемой волны λ , окончательно формируется в зоне Фраунгофера, определяемой соотношением

$$r \gg \frac{l^2}{\lambda} \quad (1)$$

Коэффициент направленного действия D характеризует выигрыш по мощности в направлении максимального излучения вследствие направленности антенны. Он равен от-

ношению мощности, излучаемой в единицу телесного угла в направлении максимума диаграммы направленности $P(\theta_m, \varphi_m)$, к средней мощности $P_{cp} = P_{изл}/(4\pi)$, излучаемой антенной по всем направлениям, т.е. $D = 4\pi P(\theta_m, \varphi_m) / P_{изл}$, где $P_{изл}$ — полная излучаемая мощность:

$$P_{изл} = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi P(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta.$$

Таким образом, имеем:

$$D = \frac{4\pi P(\theta_m, \varphi_m)}{\int_0^\pi d\varphi \int P(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta} \quad (2)$$

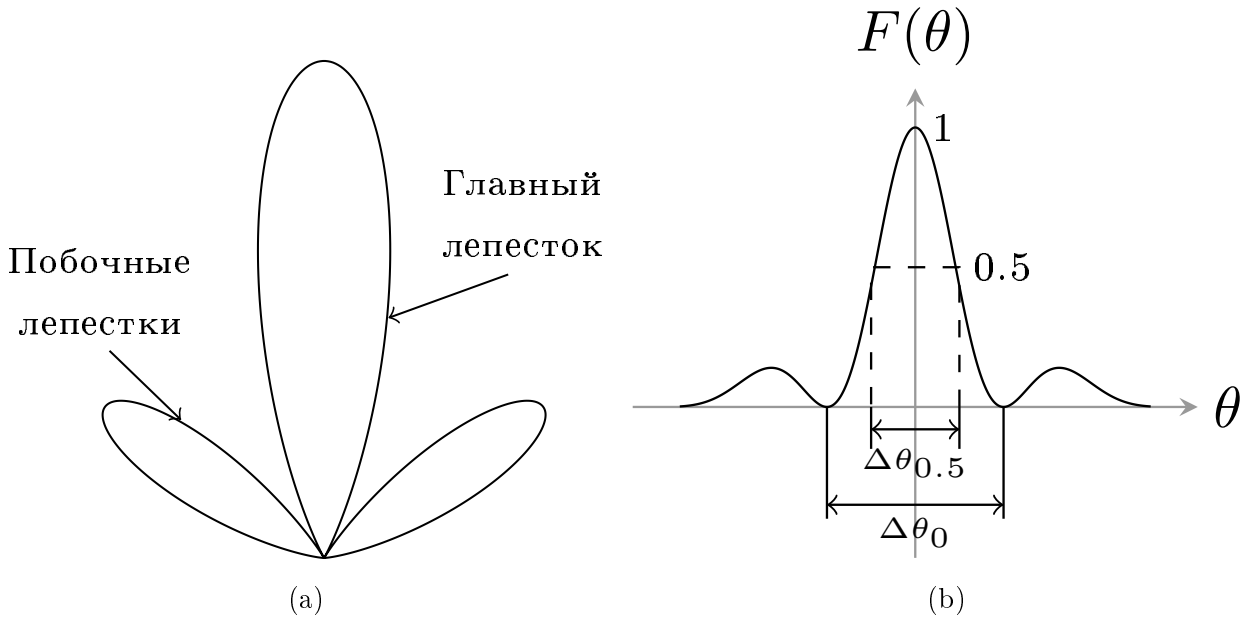


Рис. 1: Диаграмма направленности

Коэффициент усиления G определяется как произведение КНД на коэффициент полезного действия (КПД) антенны η (или, точнее, всего антенного тракта):

$$G = D\eta \quad (3)$$

Этот последний коэффициент в свою очередь есть отношение полной мощности $P_{изл}$, излучаемой антенной, к полной мощности $P_{подв}$, подводимой к антенне, т.е.

$$\eta = \frac{P_{изл}}{P_{подв}} = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi P(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta}{P_{подв}} \quad (4)$$

В силу принципа взаимности ДН и КНД антенны при ее работе в режиме передачи и в режиме приема совпадают.

Для адекватного описания *приемной антенны* вводятся некоторые дополнительные характеристики. Одна из основных таких характеристик — эффективная площадь приема антенны A .

Эффективная площадь приема A определяется как отношение полной принимаемой антенной мощности $P_{пр}$ к плотности потока падающего излучения S_n в месте расположения антенны:

$$A = \frac{P_{пр}}{S_n} \quad (5)$$

Как показано в [1,2], величины A и D связаны соотношением

$$A = \frac{\lambda^2}{4\pi} D. \quad (6)$$

Цель настоящей работы заключается в экспериментальном определении КНД пирамидальной рупорной антенны с помощью так называемого зеркального метода (метода Парселла) и сравнении измеренного значения с рассчитанным теоретически. Зеркальный метод опирается на использование идеально (зеркально) отражающей плоской поверхности, расположенной в зоне Фраунгофера и ориентированной параллельно излучающей апертуре (см. рис. 2).

Согласно методу изображений отыскание отраженного поля, поступающего в антенну, сводится к нахождению поля, принимаемого от аналогичной зеркальной относительно отражающей плоскости излучающей антенны (рис. 2). В результате последовательного пересчета имеем: мощность, излучаемая гипотетической зеркальной антенной в единицу телесного угла в направлении на реальную антенну, равна $P_n = DP_{изл}/4\pi$, откуда плотность потока энергии в месте приема $S_n = P_n/4X^2 = DP_{изл}/(16\pi X^2)$, где X — расстояние между антенной и отражающей плоскостью; наконец, мощность, принимаемая антенной, равна $P_{пр} = AS_n = ADP_{изл}/(16\pi X^2)$. С учетом 6 окончательно получаем

$$\frac{P_{пр}}{P_{изл}} = \frac{D^2 \lambda^2}{64\pi^2 X^2} \quad (7)$$

отсюда интересующая нас величина D представляется в виде

$$D = \frac{8/\pi X}{\lambda} \sqrt{\frac{P_{пр}}{P_{изл}}} \quad (8)$$

Таким образом, экспериментальное определение КНД требует нахождения отношения принимаемой зеркально отраженной мощности к мощности, излучаемой пирамидальной рупорной антенной.

Измерительная установка включает генератор СВЧ диапазона (длина излучаемой волны $\lambda \approx 3$ см) с отдельным блоком питания, волноводный тракт с измерительной линией

и амперметром к ней, пирамидальный рупор, отражающий щит, щит с поглощающим покрытием. Блок-схема установки представлена на рис. 3. Отражающий щит должен располагаться в зоне Фраунгофера $X \gg l_{1,2}^2/\lambda$ ($l_{1,2}$ — линейные размеры раскрыва рупора) и иметь линейные размеры $L_{1,2}$, позволяющие перекрывать основной лепесток диаграммы направленности: $L_{1,2} > X \cdot \Delta\theta_{1,2} \approx X \cdot 2\lambda/l_{1,2}(\Delta\theta_{1,2}$ — ширина основного лепестка в горизонтальной или вертикальной плоскости). Убедитесь, что эти условия выполнены! Установка позволяет контролируемо менять расстояние $X + \Delta X$ между антенной и отражательным щитом в пределах $\Delta X \sim 100$ см. Следует особо подчеркнуть, что в измерительной линии используется квадратичный детектор, поэтому показания амперметра пропорциональны квадрату напряженности электрического поля в месте расположения зонда измерительной линии.

В согласованном (с хорошей точностью) режиме, когда отражение от конца волновода отсутствует, коэффициент отражения Γ волны в волноводном тракте совпадает с членом $P_{np}/P_{изл}$, содержащимся в 8, и очевидным образом представляется через коэффициент бегущей волны (КБВ) в волноводе $\kappa = E_{min}/E_{max}$ ($\Gamma = (1 - \kappa)/(1 + \kappa)$), определяемый с помощью измерительной линии. Здесь E_{min}, E_{max} — соответственно минимальное и максимальное значения поля в волноводном тракте. В результате получаем следующую формулу для КНД:

$$D = \frac{8\pi X}{\lambda} \frac{1 - \kappa}{1 + \kappa} \quad (9)$$

Если детектор в измерительной линии квадратичный, то амперметр дает значения, пропорциональные $|E|^2$, так что вместо κ измеряется величина $K = \kappa^2$; при этом вместо 9 нужно использовать выражение

$$D = \frac{8\pi X}{\lambda} \frac{1 - \sqrt{K}}{1 + \sqrt{K}} \quad (10)$$

Итак, при наличии эффективного и надежного согласующего устройства отыскание КНД зеркальным методом сводится к процедуре согласования и последующего измерения КБВ в подводящем волноводном тракте. Согласование достигается за счет включения в волноводный тракт этого устройства (показано пунктиром на рис. 3) при использовании дополнительного щита с поглощающим покрытием, перехватывающего поле излучения (штрихпунктирная линия на том же рисунке).

Вы будете работать в несогласованном режиме, когда согласующее устройство отсутствует и специальной процедуры согласования не проводится. С учетом отражения от конца подводящего тракта поле на оси волновода, отнормированное на амплитуду падающей волны, для некоторого фиксированного положения рупора запишется, очевидно, в виде

$$E = 1e^{-ihx} + \Gamma_{\kappa}e^{i\varphi_{\kappa}}e^{ihx} + \Gamma e^{e\varphi}e^{ihx} \quad (11)$$

где x - координата, отсчитываемая от конца волноводного тракта (см. рис. 4); h — постоянная распространения волны в волноводе; $\Gamma_\kappa e^{i\varphi_\kappa}$ - коэффициент отражения от конца тракта; $\Gamma e^{e\varphi}$ — коэффициент отражения, обусловленный отражающим щитом. Выясните, на каком типе волны вы работаете и восстановите структуру электрического и магнитного полей в этой волне! Смещение антенны на величину ΔX приведет к появлению в последнем члене в 11 дополнительного множителя $e^{ik_0 2\Delta X}$, связанного с дополнительным набегом фазы в свободном пространстве ($k_0 = \omega/c$ — соответствующее волновое число). В результате для $|E|^2$ будем иметь

$$|E|^2 = 1 + \Gamma_\kappa^2 + \Gamma^2 + 2\Gamma_\kappa \Gamma \cos(\varphi - \varphi_\kappa + k_0 2\Delta X) + \\ + 2\Gamma_\kappa \cos(2hx + \varphi_\kappa) + 2\Gamma \cos(2hx + \varphi + k_0 2\Delta X) \quad (12)$$

Поскольку Γ_κ и Γ достаточно малы, то квадратичными величинами в первом приближении можно пренебречь, т.е. опустить второй, третий и четвертый члены в 12; тогда эта формула упрощается к виду

$$|E|^2 \approx 1 + 2\Gamma_\kappa \cos(2hx + \varphi_\kappa) + 2\Gamma \cos(2hx + \varphi + k_0 2\Delta X) \quad (13)$$

Все возможные способы определения КНД на данной установке опираются в той или иной степени на эту формулу. Два таких способа изложены в задании к работе. Попробуйте предложить другие способы. Еще раз подчеркнем, что КНД однозначно определяется коэффициентом Γ :

$$D = \frac{8\pi X}{\lambda} \Gamma. \quad (14)$$

2. Задание

1. Помещая перед раскрытом рупора щит с поглощающим покрытием и убирая тем самым отраженное от металлического щита поле ($\Gamma \approx 0$), снимите распределение поля в волноводном тракте, т.е. зависимость $|E|^2(x)$ на оси волновода. Определите значение коэффициента отражения от конца волновода Γ_κ и оцените КПД системы, связанный с ее недостаточным согласованием. По длине волны в волноводе $\lambda_\text{в}$ определите длину волны в свободном пространстве λ .
2. Выберите такое положение x зонда измерительной линии, при котором $\cos(2hx + \varphi_\kappa)$, и зафиксируйте его. Уберите щит с поглощающим покрытием. Меняя затем положение антенны в пределах интервала, включающего несколько длин волн, снимите зависимость $|E|^2(\Delta X)$. Определите значение коэффициента Γ , связанного с отражением от металлического щита, и по нему КНД заданной пирамидальной рупорной

антенны. Убедитесь, что величины Γ_κ^2 , Γ^2 и $\Gamma_\kappa\Gamma$ действительно достаточно малы. Выясните, как с помощью полученной зависимости можно определить значение длины волны в свободном пространстве.

3. Зафиксируйте положение антенны относительно металлического щита и определите отношение минимального E_{min} и максимального E_{max} значений поля в волноводном тракте: $\kappa = E_{min}/E_{max}$. Убедитесь, что эта величина зависит от расстояния $X + \Delta X$ до щита. Меняя положение антенны, снимите зависимость

$$\tilde{\Gamma}(\Delta X) = \frac{1 - \kappa(\Delta X)}{1 + \kappa(\Delta X)} = \frac{1 - \sqrt{K(\Delta X)}}{1 + \sqrt{K(\Delta X)}}$$

С помощью формулы 13 покажите, что максимальное значение Γ приближенно равно $\Gamma_{max} \approx \Gamma + \Gamma_\kappa$. Учитывая это и используя найденное в п. 1 значение Γ_κ , определите коэффициент Γ и КНД антенны. Сопоставьте результаты с полученными ранее (п.2) и оцените погрешности обоих методов.

4. Опираясь на электродинамическую формулировку принципа Гюйгенса [3] и используя кирхгофовское приближение для задания поля на рас-крыве рупора, рассчитайте теоретически его КНД. При расчете воспользуйтесь дополнительным упрощающим предположением о синфазности поля на раскрыве рупора. Подумайте, является ли в действительности данное поле синфазным и как неоднородность фазы поля на раскрыве рупора сказывается на КНД.
5. Сравните экспериментальные и теоретические результаты. Объясните причины возможных расхождений.

Литература

1. Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терешин О.Н. Антенны УКВ. Ч.І. М.: Связь, 1977. Гл.8, §§8.2, 8.4; гл.12, §§12.5,12.8; гл.16, §§16.1-16.4.
2. Айзенберг Г.З. Антенны ультракоротких волн. М.: Связьиздат, 1957. Гл-VI, §§1,2; гл.VIII, §§2; гл.XII, §§4-7; гл.XVI, §§1-4.
3. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988. Гл. VII, §§38-41; гл. X, §§54-56; гл. XVII, §§92,93,95,98.