

РОЗДІЛ «РАДІОЕЛЕКТРОНІКА»

УДК 621.391

РЯЗАНЦЕВ О. В., к.ф.-м.н., доцент
КУЛИК М. В., ассистент

Днепродзержинский государственный технический университет

ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА НАПРАВЛЕННОСТИ ДЕЙСТВИЯ АНТЕНН

Введение. Наиболее наглядной характеристикой направленных свойств антенн является объёмная амплитудная диаграмма направленности (ДН), которая, как правило, является осесимметричной, а на рисунках приводятся её осевые сечения в E и H плоскостях, которые в общем случае несколько различны (поворотная симметрия второго порядка, относительно оси). То есть в любом нормальном сечении объёмной ДН получается фигура вида эллипса, а в случае совпадения – окружность. Однако для расчётов необходимо ввести некоторую числовую характеристику, желательную безразмерную, которая бы однозначно характеризовала направленные свойства антенн [1]. Для этого вводится понятие эталонного источника, роль которого играет абсолютно ненаправленный изотропный излучатель. Объёмная ДН такого источника представляет собой сферу с единичным радиусом, а любое диаметрально сечение – окружность с единичным радиусом. Дело в том, что обычно используется так называемая нормированная ДН, причём нормировка выполняется по направлению максимального излучения, то есть размах таких ДН лежит в диапазоне от 0 до 1 [2, 3].

Классическое определение коэффициента направленности действия (КНД) антенны формируется следующим образом: величиной КНД называют число, которое показывает, во сколько раз мощность излучения антенны в направлении максимального излучения больше, чем мощность излучения эталонного источника (ЭИ), при условии, что к антенне и к ЭИ подводится одна и та же мощность.

Постановка задачи. Цель работы – получение общего аналитического выражения для КНД, его геометрические интерпретации, упрощённые выражения для оценки КНД на некоторых типовых примерах.

Результаты работы. Для получения общей расчётной формулы КНД удобно, во-первых: использовать сферическую систему координат с переменными r , θ , φ , где r – радиус-вектор, проведенный из центра координат в исследуемую точку; θ – полярный угол, отсчитываемый от оси OZ к данному вектору; а φ – азимутальный угол, отсчитываемый от оси OX к проекции радиус-вектора на плоскость $ХОУ$. Центр ДН ЭИ и исследуемой антенны совмещают с центром системы координат. Во-вторых, в данном случае удобно ввести понятие угловой плотности потока излучаемой энергии, т.е. пронормировать этот поток по элементарному телесному углу для данного направления $d\Omega = dS/r^2$. Тогда, если обозначить угловую плотность мощности излучения ЭИ как P_{Ω} и учесть, что эта плотность для ЭИ одинакова во всех направлениях, а также тот факт, что телесный угол сферы 4π ст. рад., то полная мощность излучения ЭИ определится как $P_{\Omega} \cdot 4\pi$.

Мощность излучения исследуемой направленной антенны определяется сложнее. В этом случае следует учесть, что угловая плотность мощности излучения является функцией угловых переменных $P_A(\theta, \varphi)$. Кроме того, необходимо определить величину элементарного телесного угла в сферических переменных. Как известно, элемен-

тарная площадка в сферических переменных определяется как площадь элементарного квадрата со сторонами $rd\theta$ и $r \sin\theta d\varphi$, то есть

$$dS = r^2 \sin(\theta) d\theta d\varphi, \quad (1)$$

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} = \sin(\theta) d\theta d\varphi. \quad (2)$$

Тогда элементарная мощность излучения антенны в некотором направлении, задаваемом углами θ и φ , выразится как

$$P_A(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi, \quad (3)$$

а полная мощность –

$$\int \int_{\theta \varphi} P_A(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi. \quad (4)$$

По определению КНД мощности излучения ЭИ и антенны должны быть одинаковы, т.е.

$$P_{\vartheta} \cdot 4\pi = \int \int_{\theta \varphi} P_A(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi. \quad (5)$$

Данное уравнение удобно поделить на мощность излучения антенны для направления, соответствующего её максимальному значению. Обычно это направление совмещают с осью OZ, тогда этому направлению будет соответствовать нулевые значения полярного и азимутального углов. То есть (5) доделим на $P_A(0,0)$. При этом в левой части (5) получим дробь $P_{\vartheta}/P(0,0)$, что по определению соответствует $1/G$, где G – обозначен КНД, то есть левая часть (5) приобретает вид $4\pi/G$. В подынтегральном выражении правой части (5) получим дробь $P_A(\theta, \varphi)/P_A(0,0)$, что по определению является нормированной ДН по мощности $F_P(\theta, \varphi)$, то есть величина КНД в самом общем виде определится как

$$G = \frac{4\pi}{\int \int_{\theta \varphi} F_P(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi}. \quad (6)$$

Заметим, что в (6) мощности излучения не фигурируют, а определение КНД свелось к обычным геометрическим представлениям и однозначно определяется ДН антенны. Учтём теперь, что мощность излучения пропорциональна квадрату напряженности E -компоненты волны, т.е. $F_P(\theta, \varphi) = F_E^2(\theta, \varphi)$. Т.о. подынтегральное выражение в знаменателе (6) приобретает вид:

$$F_E^2(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi = F_E^2(\theta, \varphi) d\Omega, \quad (7)$$

где $F_E^2(\theta, \varphi)$ играет роль квадрата радиус-вектора телесного угла для данного направления.

По определению телесного угла выражение (7) представляет собой элементарную площадку объёмной ДН для некоторого направления, задаваемого углами θ и φ . Тогда знаменатель (6) приобретает смысл общей поверхности объёмной ДН, которая

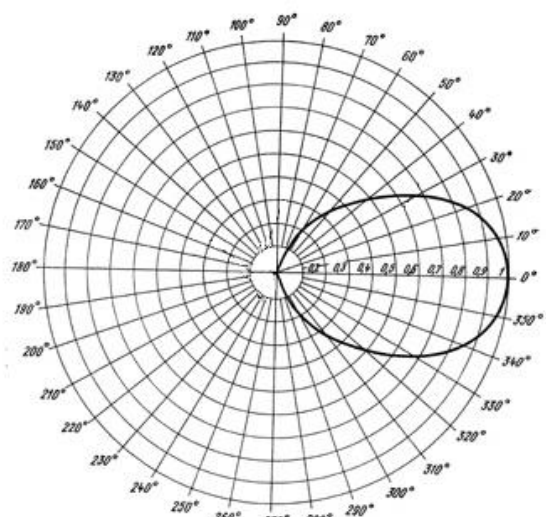


Рисунок 1 – Нормированные ДН ЭИ (окружность) и направленной антенны

рассчитана по формуле (6), если известно аналитическое выражение для $F_p(\theta, \varphi)$ или $F_E^2(\theta, \varphi)$.

Общее выражение для КНД (6) можно существенно упростить, если считать, что ДН в E и H плоскостях практически одинакова. Это означает, что при фиксированном θ функция $F_p(\theta, \varphi)$ не зависит от φ , т.е. ДН определяется только полярным углом θ . Тогда интегрирование по θ и φ можно вести раздельно. Знаменатель (6) можно представить в виде:

$$\int_{\varphi} d\varphi \int_{\theta} F_E^2(\theta) \sin(\theta) d\theta, \tag{8}$$

а переменная φ в этом случае будет играть роль циклической, т.е. интегрирование по φ должно проводиться во всём диапазоне углов от 0 до 2π . Результатом этого интегрирования будет 2π , а выражение (6) приобретает вид:

$$G = \frac{2}{\int_{\theta} F_E^2(\theta) \sin(\theta) d\theta}. \tag{9}$$

Пусть, например, в качестве антенны взят изотропный источник, у которого $F_p(\theta) = 1$ во всём диапазоне полярных углов от 0 до π , тогда интеграл

$$\int_0^{\pi} \sin(\theta) d\theta = \cos(\theta) \Big|_{\pi}^0 = 2, \text{ т.е. КНД изотропного излучателя, как и следовало ожи-}$$

дать, оказывается равным единице и меньше быть не может, в связи с чем такой излучатель и выбран в качестве эталонного. С другой стороны, можно представить себе идеальный, абсолютно направленный излучатель, ДН которого стягивается в линию, поверхность которой стремится к нулю. Из геометрических представлений КНД следует, что если $G = S_{\Omega} / S_A$, где S_{Ω} – поверхность единичной сферы ДН ЭИ, а S_A – поверхность ДН направленной антенны с единичным размахом, то при условии $S_A \rightarrow 0 \Rightarrow G \rightarrow \infty$, т.е. КНД представляет собой числа в диапазоне от 1 до ∞ .

для направления максимального излучения имеет единичную длину. Числитель (6) равен 4π , однако, учитывая, что ДН ЭИ также нормирована, т.е. имеет единичный радиус, этот числитель можно представить, как $4\pi \cdot 1^2$, где 4π – полный телесный угол сферы. Тогда числитель (6) также имеет смысл поверхности, в которой заключена ДН ЭИ. В результате получаем, что КНД приобретает смысл числа, которое показывает, во сколько раз поверхность ДН ЭИ больше, чем поверхность ДН направленной антенны, при условии, что сфера и максимальный размах ДН антенны единичны (рис.1).

Таким образом, как видно, понятие КНД свелось к геометрическим представлениям, а сама величина КНД может быть

Рассмотрим в качестве ещё одного примера довольно распространённую ситуацию, когда $F_p(\theta)$ изменяется по закону косинуса (косинусный излучатель). Тогда в

знаменателе (9) получаем: $\int_0^{\pi/2} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta = \frac{\sin^2(\theta)}{2} \Big|_0^{\pi/2} = \frac{1}{2}$, т.е. $G = 4$. Иными

словами, направленные свойства такого излучателя в 4 раза лучше, чем изотропного.

Для узконаправленных антенн угол θ в пределах ДН лежит в небольшом диапазоне углов – до 5° (полуширина ДН). В этом случае упрощённо можно считать, что $F_p(\theta) \approx 1$, а значение $\sin(\theta)$ можно заменить значением θ в радианах. Тогда в зна-

менателе (9) получаем: $\int_{\theta} \theta d\theta = \frac{\theta^2}{2}$, а выражение для оценочных расчётов КНД узко-

направленных антенн приобретает очень простой вид: $G = \frac{4}{\theta^2}$. Причём, если ДН в E и

H плоскостях существенно различны, то θ^2 можно представить в виде произведения

$\theta_E \cdot \theta_H$, т.е. $G = \frac{4}{\theta_E \cdot \theta_H}$, где θ_E и θ_H соответственно полуширины ДН в E и H плос-

костях.

Так как эти величины чаще всего выражаются в угловых градусах, то:

$$G = \frac{4 \cdot 57 \cdot 57}{\theta_E \cdot \theta_H} \approx \frac{1,3 \cdot 10^4}{\theta_E \cdot \theta_H}. \quad (10)$$

Ещё более точные результаты с помощью такой формулы получаются, если учесть, что θ_E и θ_H выражают не весь диапазон углов, в которых лежит ДН, а именно её полуширину, в этом случае числитель (10) имеет величину $0,8 \cdot 10^4$, а сама формула (10) может использоваться для инженерных расчётов КНД узконаправленных антенн, только по значению полуширины ДН.

Для ненормированной ДН КНД можно интерпретировать следующим образом. При непосредственном измерении ДН удобно пользоваться поверхностной плотностью мощности излучения $\Pi(\theta, \varphi)$, т.е. $\Delta W = \Pi(\theta, \varphi) \Delta S$, где ΔS – площадь поверхности датчика. Тогда для ЭИ получаем $W_3 = \Pi_3 \cdot 4\pi R^2$ и если на графике ДН откладывать непосредственно значения Π , то:

$$W_3 = 4\pi \cdot \Pi_3^3 = 3 \cdot \frac{4}{3} \pi \Pi_3^3 = 3V_3, \quad (11)$$

где V_3 – объём ДН ЭИ, W_3 – общая мощность излучения. Как видно, эта мощность определяется именно объёмом ДН.

Учитывая условия баланса мощности излучения в определении КНД, величину W_3 необходимо приравнять к мощности излучения направленной антенны W_A . Имея в виду конечность поверхности датчика, получаем:

$$\begin{aligned} W_A &= \sum_{\theta} \sum_{\varphi} \Pi(\theta, \varphi) \cdot \Delta S = \sum_{\theta} \sum_{\varphi} \Pi_A(\theta, \varphi) \cdot \Pi_A^2(\theta, \varphi) \cdot \sin(\theta) \Delta\theta \Delta\varphi = \\ &= \sum_{\theta} \sum_{\varphi} \Pi_A^3(\theta, \varphi) \cdot \sin(\theta) \Delta\theta \Delta\varphi, \end{aligned} \quad (12)$$

а в упрощённом варианте

$$W_A = 2\pi \sum_{\theta} P_A^3(\theta) \sin(\theta) \Delta\theta. \quad (13)$$

Учитывая, что объём элементарного конуса

$$\Delta V_A = \frac{1}{3} \Delta S \cdot P_A(\theta) = \frac{1}{3} P_A^3(\theta) \sin(\theta) \Delta\theta, \quad (14)$$

получаем

$$W_A = 6\pi \sum_{\theta} \frac{1}{3} P_A^3(\theta) \sin(\theta) \Delta\theta = 6\pi V_A, \quad (15)$$

где V_A – объём ДН направленной антенны. Тогда, по определению КНД

$$3V_{\varphi} = 6\pi V_A \Rightarrow V_{\varphi} = 2\pi V_A, \quad (16)$$

т.е. $V_{\varphi} \sim V_A$.

Для сечения объёмной ДН, т.е. при фиксированном значении φ , коэффициент 2π исчезает (результат интегрирования по φ), и площади ДН для ЭИ и направленной антенны должны быть равны. Изложенное иллюстрирует рис.2.

На рис.2 необходимо выполнить условие $S_{\varphi} = S_A$, тогда КНД определится как

$$G = \frac{P_A(0,0)}{P_{\varphi}}. \quad (17)$$

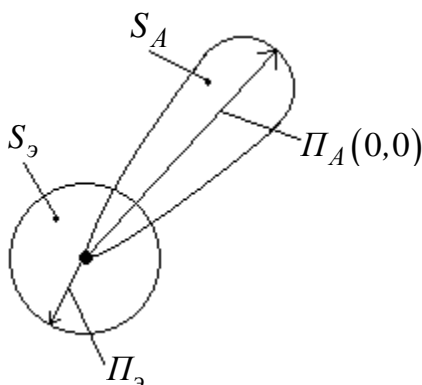


Рисунок 2 – Ненормированная ДН ЭИ и направленной антенны

Выводы.

1. В работе получены строгое выражение для КНД направленных антенн, которое следует из классического определения, приближенное выражение КНД для объёмной ДН одинаковой в E и H плоскостях, приближенная формула для инженерных расчётов КНД, использующая только значение полуширины ДН в E и H плоскостях, а также получена геометрическая интерпретация КНД для случая ненормированной ДН.

2. Показано, что выражение для КНД можно свести к сугубо геометрической интерпретации, использующей площади поверхности объёмной ДН ЭИ и направленной антенны, причём ДН антенны должна быть определённым образом вписана в ДН ЭИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ротхаммель К. Антенны. Т. 1 / Ротхаммель К. – 11-е изд. – М.: Додека, 2005. – 618с.
2. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн: учебник для вузов / Ерохин Г.А., Чернышев О.В., Козырев Н.Д., Кочержевский В.Г.; под. ред. Г.А.Ерохина. – 3-е изд. – М.: Наука, 2007. – 491с. ISBN 978-5-93517-370-8.
3. Микроволновые технологии в телекоммуникационных системах / Нарытник Т.Н., Бабак В.П., Ильченко М.Е., Кравчук С.А. – Киев: Техника, 2000. – 286с.

Поступила в редколлегию 25.10.2016.