

Слайды к лекциям

проф. Кубанова Виктора Павловича по дисциплине

«Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства»

Направление - ИКТ и СС. Профиль - сети и системы радиосвязи

Тема

«ПАРАМЕТРЫ АНТЕНН»

Основная литература

1. *Ерохин Г.А.* и др. **Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн.** М.: Горячая линия Телеком, 2-ое издание 2004. – 491 с.

Дополнительная литература

1. *Кубанов В.П.* **Антенны и фидеры – назначение и параметры.** Учебное пособие для вузов. – Самара: ПГУТИ, 2012. – 60 с.

2. *Кубанов В.П.* **Элементарные излучатели электромагнитных волн.**

Учебное пособие для вузов. – Самара: ПГУТИ, 2011.–40 с.

3. *Кубанов В.П.* **Линейные симметричные электрические вибраторы.**

Учебное пособие для вузов. – Самара: ПГУТИ, 2012. – 60 с.

4. *Кубанов В.П.* **Направленные свойства антенных решеток.**

Учебное пособие для вузов. – Самара: ПГУТИ, 2011. – 56 с.

5. *Кубанов В.П.* **Излучение возбужденных поверхностей.**

Учебное пособие для вузов. – Самара: ПГУТИ, 2011. – 56 с.

6. *Кубанов В.П.* **Влияние окружающей среды на распространение радиоволн.**

Учебное пособие для вузов. – Самара: ПГУТИ, 2013. – 92 с.

АЛГОРИМ ПЕРЕДАЧИ И ПРИЕМА СООБЩЕНИЙ

$a(x, y, z, t)$ – исходное сообщение

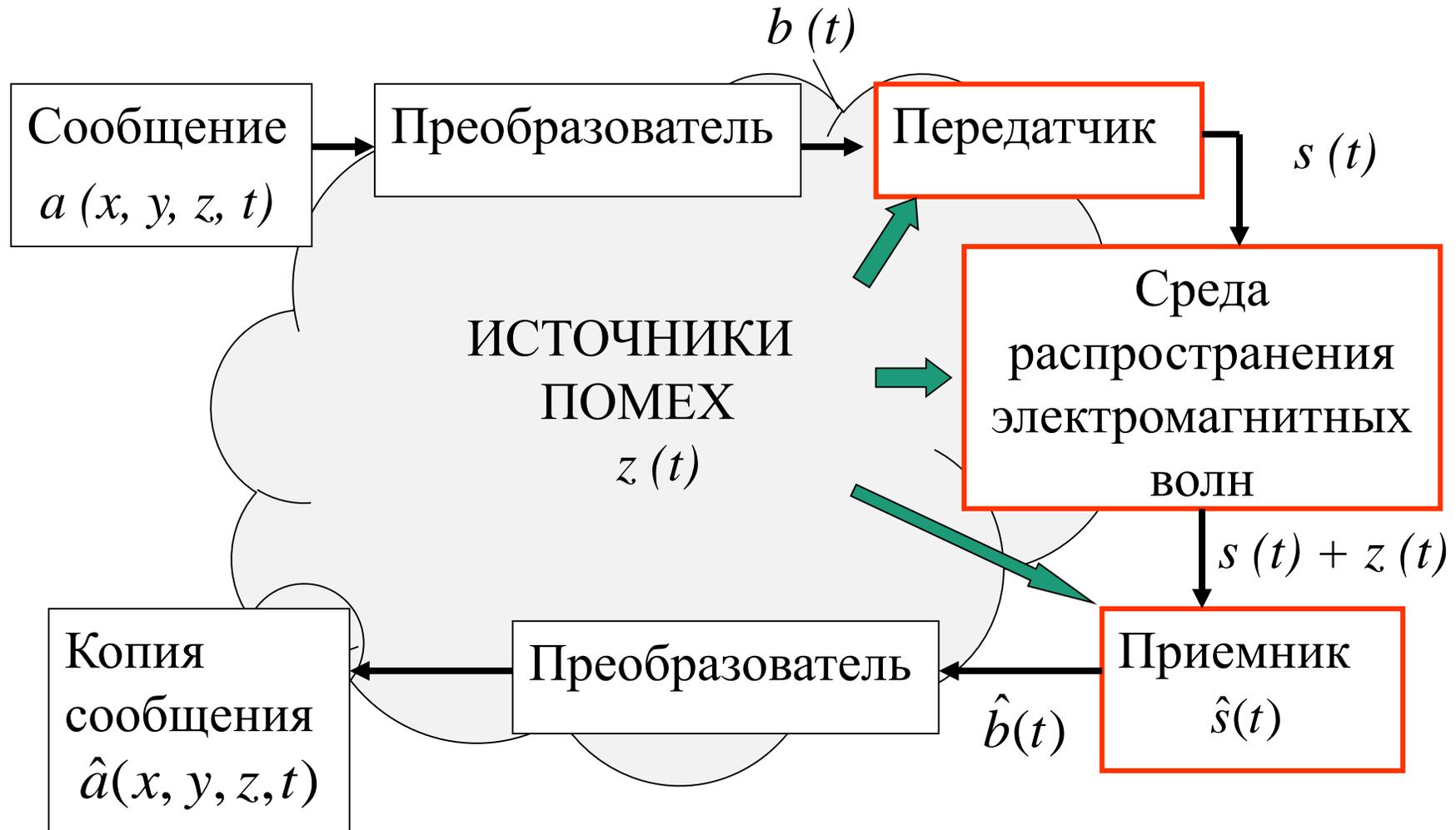
Передача:

1. Формирование первичного сигнала $b(t)$
2. Формирование линейного сигнала $s(t)$
3. Распространение линейного сигнала через среду распространения $s(t) + z(t)$

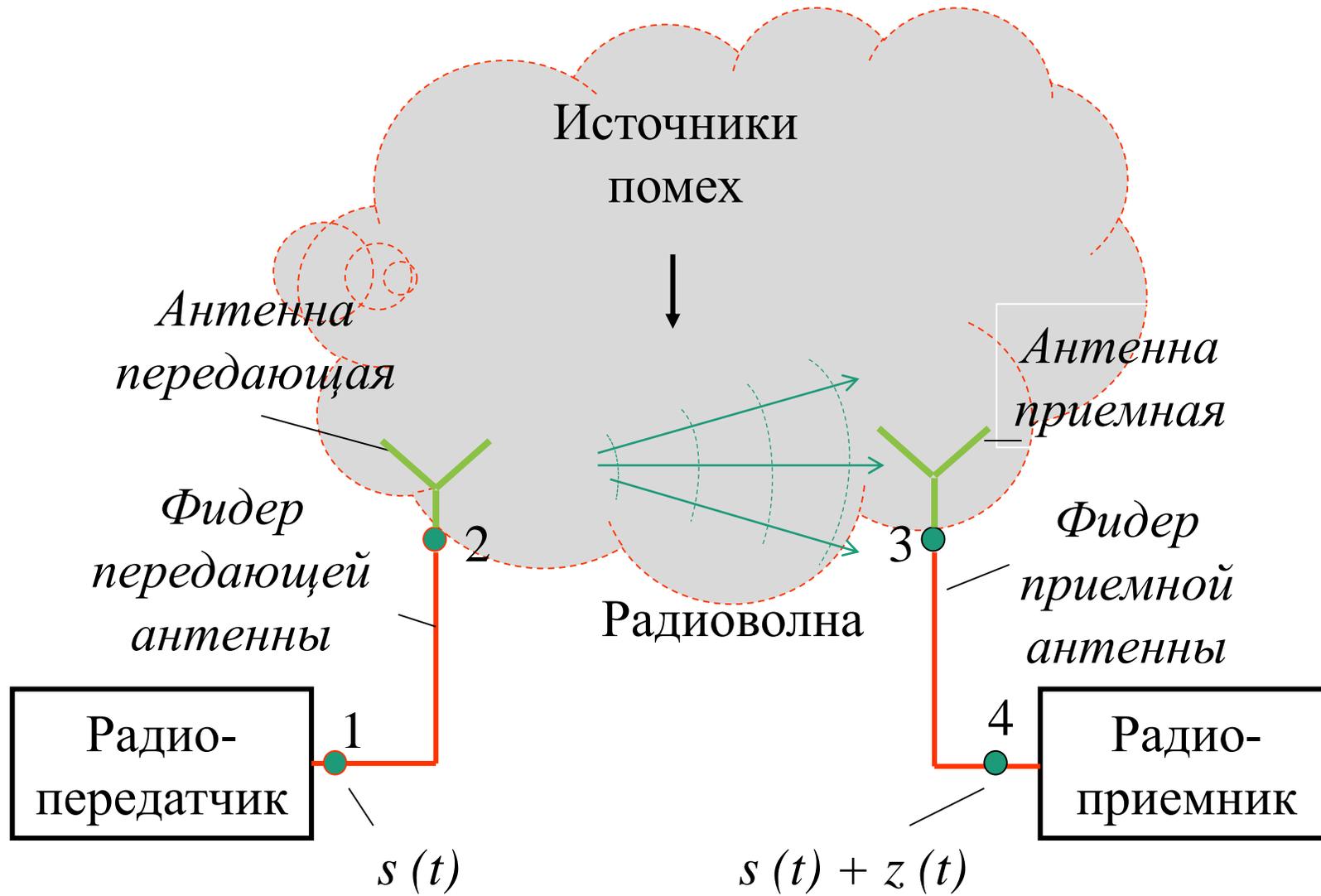
Прием:

1. Выделение копии линейного сигнала $\hat{s}(t)$
2. Выделение копии первичного сигнала $\hat{b}(t)$
3. Выделение копии сообщения $\hat{a}(x, y, z, t)$

ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ И ПРИЕМА СООБЩЕНИЙ



ЛИНИЯ РАДИОСВЯЗИ



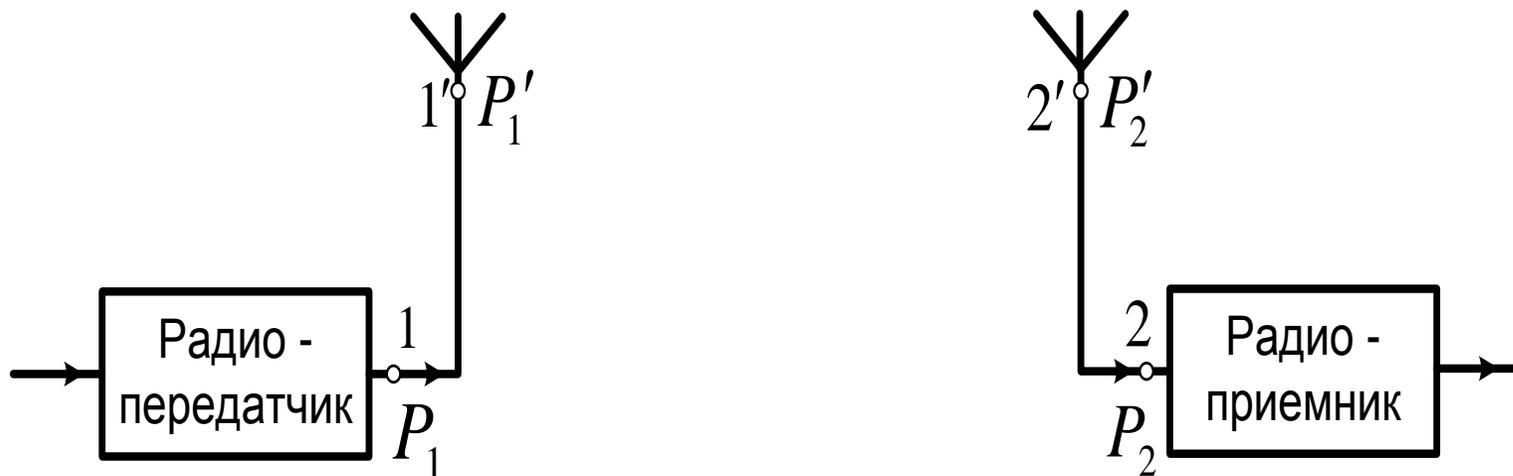
ТРЕБОВАНИЯ К ПЕРЕДАЮЩИМ АНТЕННАМ

1. Иметь возможно больший коэффициент полезного действия.
2. Обладать требуемой пространственной направленностью излучения.
3. Иметь входное сопротивление, которое с учетом фидера обеспечивает необходимое согласование .
4. Обеспечивать требуемый вид поляризации излучаемой радиоволны.
5. Обладать необходимой электрической прочностью.
6. Соответствовать требованиям электромагнитной безопасности.
7. Иметь определенную полосу рабочих частот.
8. Обеспечивать удобство и безопасность эксплуатации.

ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕДАЮЩИХ АНТЕНН

1. Коэффициент полезного действия (КПД).
2. Характеристика (диаграмма) направленности.
3. Коэффициент направленного действия (КНД).
4. Коэффициент усиления (КУ).
5. Входное сопротивление.
6. Поляризация излучаемого поля.
7. Эффективная площадь.
8. Действующая длина.
9. Эффективно излучаемая мощность
10. Эквивалентная изотропно излучаемая мощность
11. Максимальная мощность, подводимая к антенне.
12. Санитарно-защитная зона.
13. Зона ограничения застройки.
14. Рабочая полоса частот.

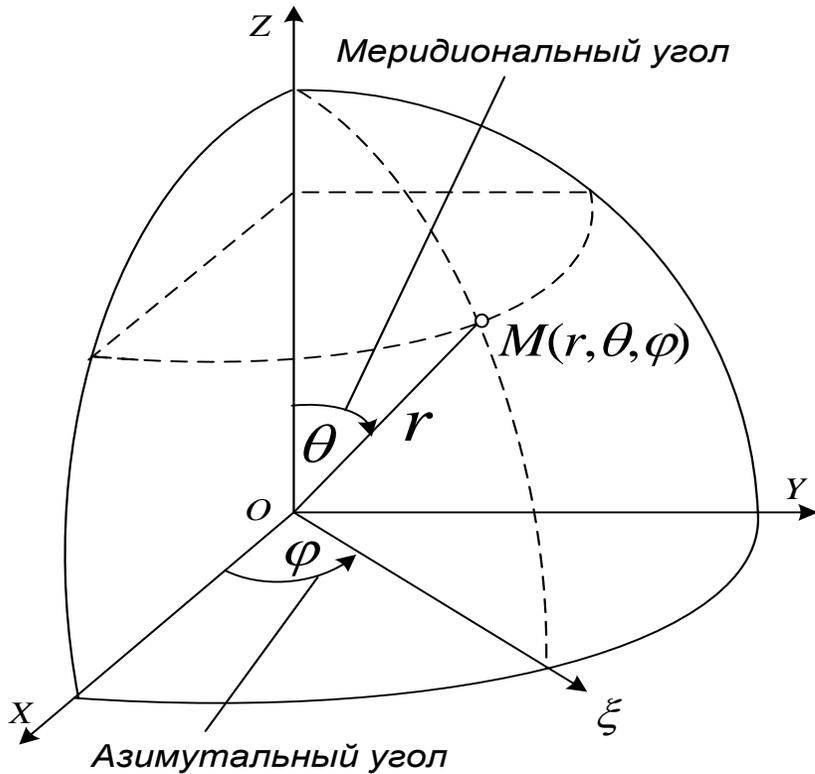
КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ



На передающей стороне точка 1 схемы соответствует выходу передатчика (входу фидера). Через P_1 обозначена мощность радиочастотного сигнала на выходе передатчика (входе фидера). Точка 1' соответствует выходу фидера (входу передающей антенны). Через P_1' обозначена мощность радиочастотного сигнала на выходе фидера (входе передающей антенны).

Реальные антенны выполняются из проводов или металлических поверхностей с конечной проводимостью или из диэлектрика, обладающего потерями. Поэтому не вся мощность радиочастотного сигнала P_1' , подводимая к антенне, преобразуется в мощность излучения P_Σ . Часть подводимой мощности выделяется в виде тепла в антенне, в близко расположенных предметах и в почве. Коэффициентом полезного действия (КПД) антенны η_a называется отношение мощности радиоизлучения, создаваемого антенной, к мощности радиочастотного сигнала, подводимого к её входу $\eta_a = P_\Sigma / P_1' = P_\Sigma / (P_\Sigma + P_\Pi)$, где P_Π – мощность потерь в антенне.

АМПЛИТУДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРАВЛЕННОСТИ



Под направленностью передающей антенны понимают её способность излучать радиоволны в определенных направлениях более эффективно, чем в других. Представление о направленности дает специальный параметр – амплитудная характеристика направленности, которая определяется как зависимость амплитуды напряженности излучаемого антенной поля (или величины, ей пропорциональной) от направления в пространстве при неизменном расстоянии до точки наблюдения M . Направление задается меридиональным (θ) и азимутальным (φ) углами сферической системы координат, как показано на рисунке.

Таким образом, амплитудная характеристика направленности описывается модулем некоторой функцией $|f(\theta, \varphi)|$. Формула для расчета модуля напряженности электрического поля антенны в произвольном направлении определяется соотношением $|E| = A|f(\theta, \varphi)|$, где A – постоянный множитель, не зависящий от направления на точку наблюдения.

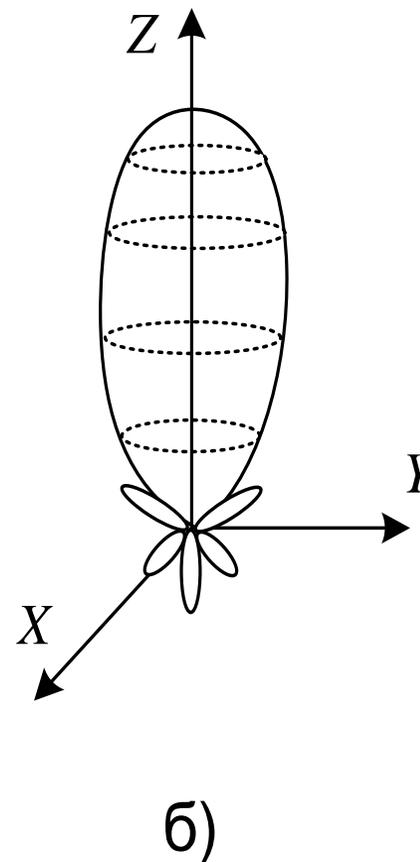
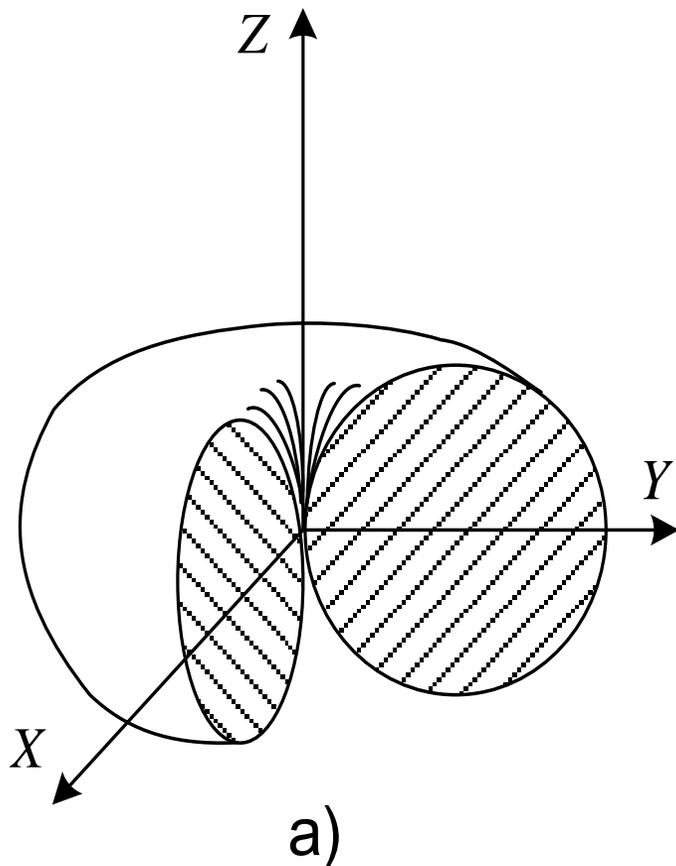
Для упрощения записи амплитудной характеристики направленности знак модуля будем опускать.

ФАЗОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРАВЛЕННОСТИ

Наряду с амплитудной характеристикой направленности антенны существует понятие фазовой характеристики направленности $\psi(\theta, \varphi)$, под которой понимается зависимость фазы напряженности поля, создаваемого антенной в точке наблюдения, от направления на эту точку. Знание фазовой характеристики направленности важно, прежде всего, для решения вопроса, имеет ли данная антенна фазовый центр. Если $\psi(\theta, \varphi) = const$ (или меняется скачком на 180° при переходе амплитудной характеристики направленности через нуль), то такая антенна имеет фазовый центр в точке, с которой было совмещено начало координат при расчете фазовой характеристики направленности. Поле излучения антенны в этом случае представляет чисто сферическую волну, исходящую из фазового центра. Фазовыми характеристиками направленности интересуются в радиолокации и радионавигации для определения угловых координат цели и в некоторых других случаях.

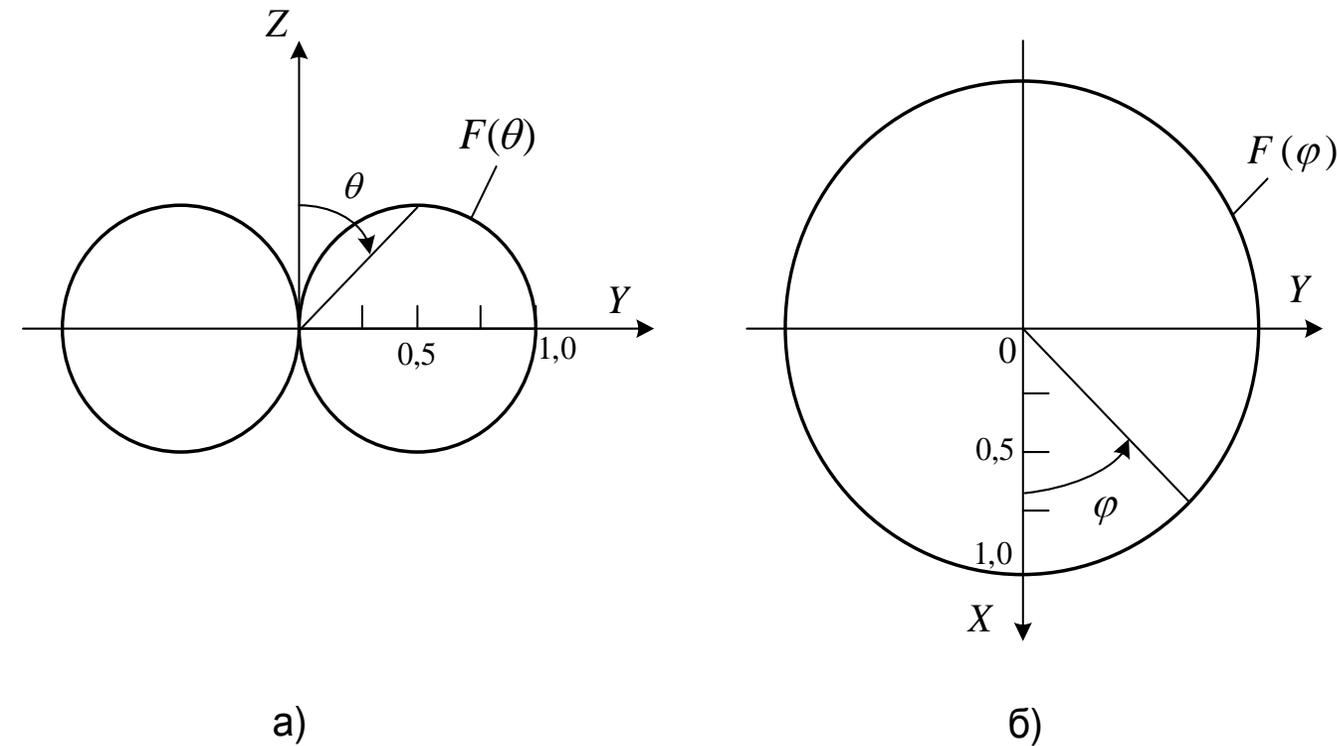
В большинстве случаев, однако, пользуются амплитудными характеристиками направленности, так как интересуются значением амплитуды напряженности поля (слово «амплитудная» в дальнейшем будем опускать)

АМПЛИТУДНАЯ ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ



Графическое изображение ХН называют диаграммой направленности (ДН). По своей сущности функция $f(\theta, \varphi)$ является аналитическим выражением (формулой) некоторой поверхности. На рисунке приведены ДН двух антенн. Диаграммы относительно просты, поскольку образованы вращением достаточно простых фигур вокруг оси Z .

ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ В ПОЛЯРНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ



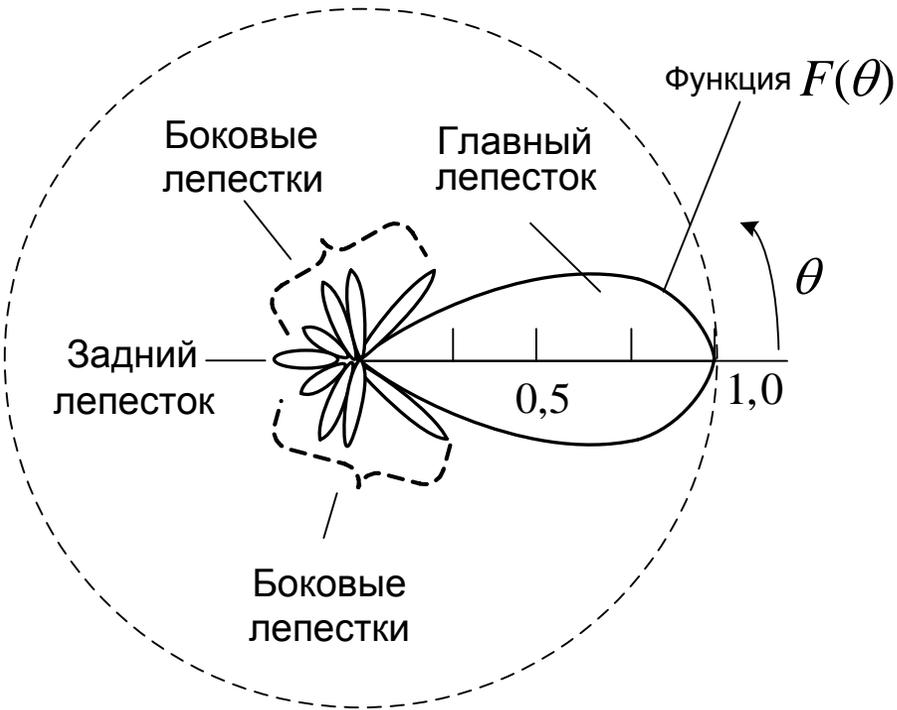
В общем случае построение графического изображения функции $f(\theta, \varphi)$ (объемной ДН) неудобно. На практике обычно строят ДН в какой-нибудь одной плоскости, в которой она изображается плоской кривой $f(\theta)$ или $f(\varphi)$. Когда речь идет о направленных свойствах антенны, то интересуются характером зависимости напряженности поля от направления на точку наблюдения, а не абсолютным значением напряженности поля.

Поэтому обычно используют понятие нормированной ДН, которое будем обозначать как $F(\theta)$ или $F(\varphi)$. Любая из этих функций легко получается путем нормирования $f(\theta)$ или $f(\varphi)$ относительно их максимальных значений:

$$F(\theta) = f(\theta)/f_{\max}(\theta), F(\varphi) = f(\varphi)/f_{\max}(\varphi).$$

Для примера приведены нормированные ДН, полученные в результате сечения фигуры на рис. а плоскостями ZOY – рис. а и XOY – рис. б. В сферической системе координат диаграмма на рис. а соответствует характеристике направленности $F(\theta)$ при $\varphi = 90^\circ$, а диаграмма на рис. б – $F(\varphi)$ при $\theta = 90^\circ$.

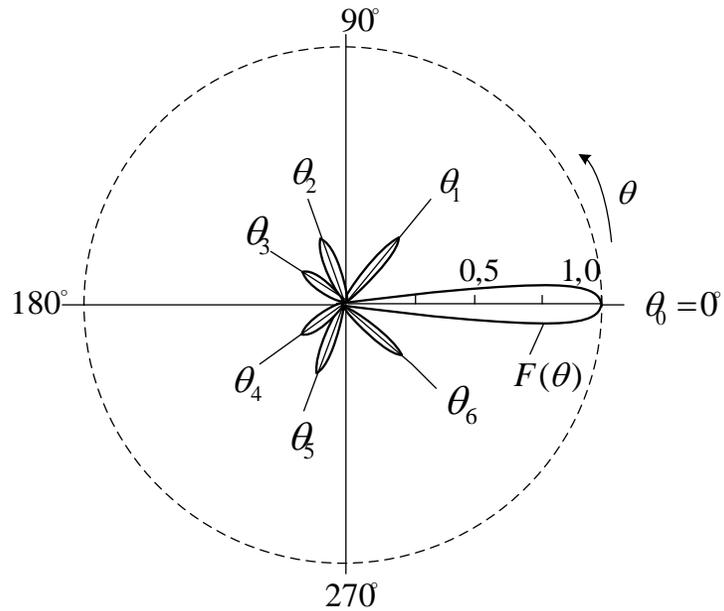
ГЛАВНЫЙ, ЗАДНИЙ И БОКОВЫЕ ЛЕПЕСТКИ ДН



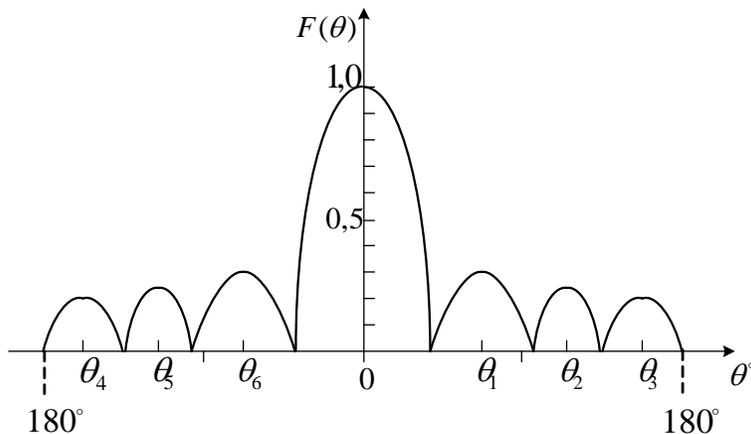
При наличии четко выраженной направленности излучения в диаграмме различают главный, задний и боковые лепестки. Главным лепестком диаграммы направленности является тот, в пределах которого излучение антенны максимально. Лепесток диаграммы направленности, направление которого образует по отношению к направлению главного лепестка угол равный или близкий 180° , называется задним. Боковым лепестком диаграммы направленности является любой лепесток кроме главного и заднего. Пример диаграммы направленности с указанием названий лепестков приведен на рисунке. Задний лепесток и боковые лепестки характеризуются своими уровнями. Под уровнем лепестка понимают отношение его максимума к максимуму главного лепестка.

Численно уровень любого лепестка равен значению нормированной характеристики направленности в точке, соответствующей направлению его максимума. В некоторых случаях говорят о кривой, которая огибает все боковые лепестки. Эта кривая так и называется «огибающая уровней боковых лепестков». В зависимости от области применения радиосредства могут меняться требования к форме и пространственной ориентации главного лепестка, уровням заднего и боковых лепестков

ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ



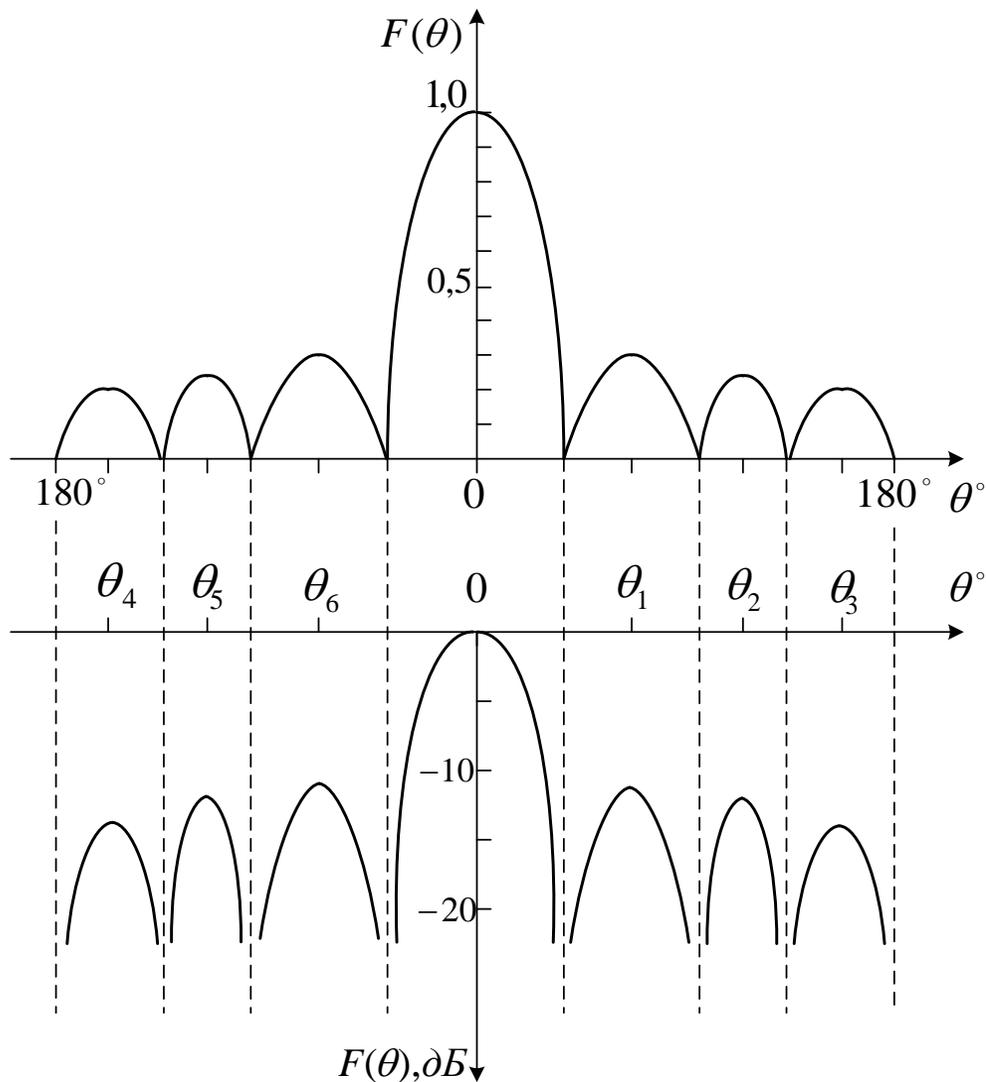
а)



б)

ДН, представленные в полярной системе координат, очень наглядны, но не всегда удобны для работы с ними, так как масштаб графика можно задавать только вдоль радиуса. Неудобств можно избежать, если ДН строить в декартовых (прямоугольных) координатах. В этом случае по оси абсцисс откладывается координатный угол, по оси ординат – нормированное значение ХН. Масштаб можно выбирать по любой координатной оси, что и предопределяет большее удобство и повышенную точность изображения. Чем уже основной лепесток многолепестковой диаграммы, тем сильнее проявляется преимущество изображения ДН в декартовой системе координат. На рис. а приведена диаграмма направленности в полярной системе координат, а на рис. б эта же диаграмма представлена в декартовой системе.

ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ В ЛОГАРИФМИЧЕСКОМ МАСШТАБЕ

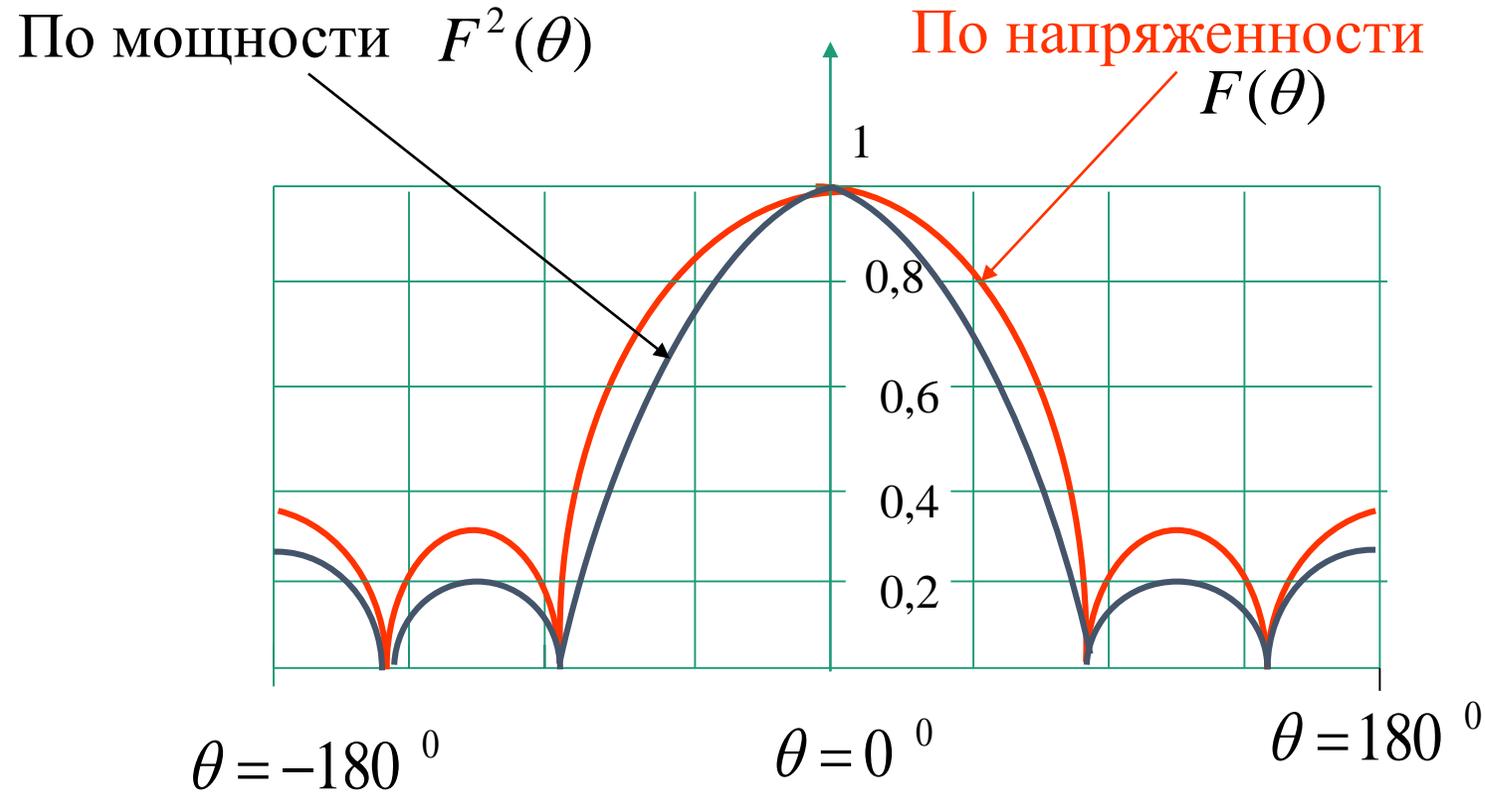


Часто при изображении диаграмм направленности в декартовой системе координат используют логарифмический масштаб (в децибелах), вводимый соотношением $F(\theta)_{\text{дБ}} = 20 \lg F(\theta)$.

Логарифмический масштаб позволяет существенно повысить точность изображения боковых лепестков с малым уровнем.

На рисунке приведена одна и та же диаграмма направленности в декартовой системе координат в относительных единицах (вверху) и децибелах (внизу). Следует обратить внимание на то, что максимальному значению $F(\theta) = 1$ соответствует $F(\theta)_{\text{дБ}} = 0$, а нулевому значению $F(\theta) = 0$ соответствуют $F(\theta)_{\text{дБ}} = -\infty$. Все значения диаграммы направленности в логарифмическом масштабе удовлетворяют условию $F(\theta)_{\text{дБ}} \leq 0$.

ХАРАКТЕРИСТИКА (ДИАГРАММА) НАПРАВЛЕННОСТИ ПО МОЩНОСТИ



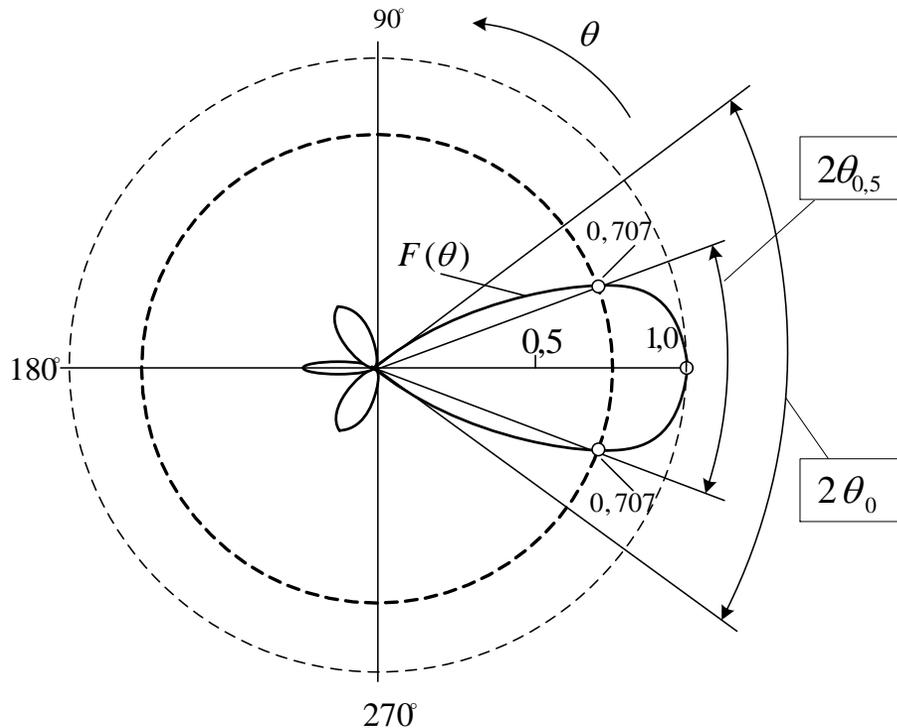
В некоторых случаях пользуются понятием ХН в квадрате $f^2(\theta, \varphi)$, которую традиционно называют ХН по мощности.

Характеристику направленности по мощности можно нормировать к максимальному значению и получить, таким образом, нормированную характеристику направленности по мощности $F^2(\theta, \varphi)$. На практике обычно рассчитывают нормированные характеристики направленности по мощности и строят соответствующие нормированные

диаграммы направленности в отдельных плоскостях, в которых они изображается плоскими кривыми $F^2(\theta)$ или $F^2(\varphi)$. Нормированная характеристика направленности по мощности, например, $F^2(\theta)$, представленная в децибелах, имеет вид $F^2(\theta)_{\text{дБ}} = 10 \lg F^2(\theta) = 20 \lg F(\theta)$.

Следует обратить внимание на то, что нормированная диаграмма направленности по мощности $F^2(\theta)$ и нормированная диаграмма направленности по полю $F(\theta)$, если их построить в линейном масштабе, не совпадут по форме. Однако, эти же диаграммы при переходе к логарифмическому масштабу (к децибелам) будут в точности совпадать, так как $20 \lg F(\theta) = 10 \lg F^2(\theta)$.

ШИРИНА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

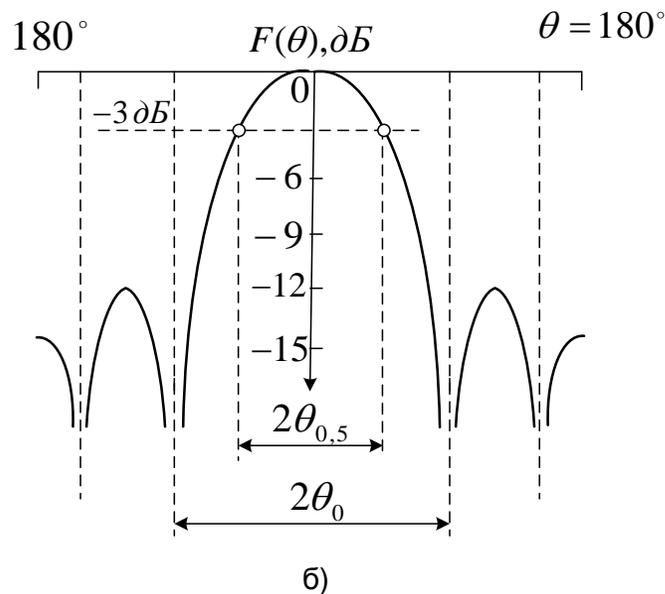
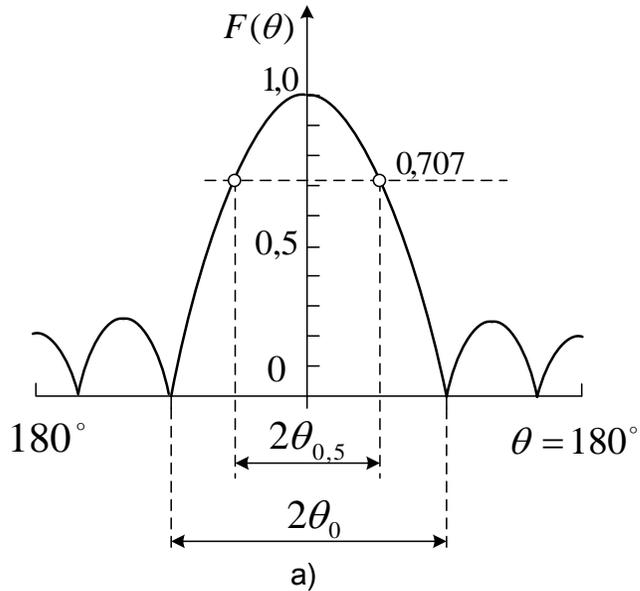


Угол между двумя направлениями ДН передающей антенны, на границах которого напряженность поля падает до определенного значения, называется шириной диаграммы направленности. Обычно вводят понятие ширины диаграммы по уровню половинной мощности $2\theta_{0,5}$ и по уровню нулевого излучения $2\theta_0$. Если рассматривать ДН по полю, то значение $2\theta_{0,5}$ соответствует углу между направлениями диаграммы, которые ограничивают главный лепесток по уровню $F(\theta) = 0,707$. Если же перейти к ДН по мощности, то значение $2\theta_{0,5}$ будет соответствовать углу между направлениями, где $F^2(\theta) = (0,707)^2 = 0,5$. На границах угла $2\theta_{0,5}$ среднее значение плотности потока энергии будет равно половине своего максимального значения.

Значение $2\theta_0$ соответствует углу между двумя направлениями диаграммы направленности, на границах которого напряженность поля падает до нулевых значений.

Примеры определения ширины главного лепестка по уровню половинной мощности $2\theta_{0,5}$ и по уровню нулевого излучения $2\theta_0$ приведены на рисунке.

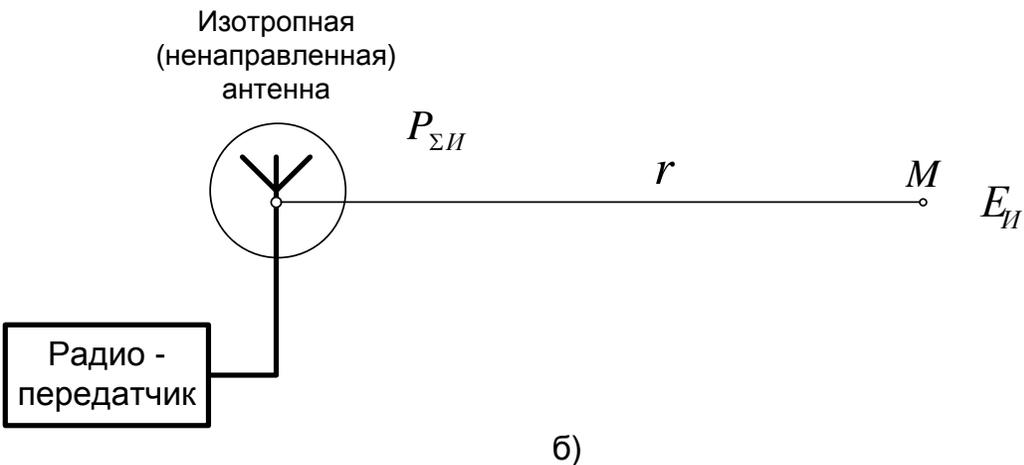
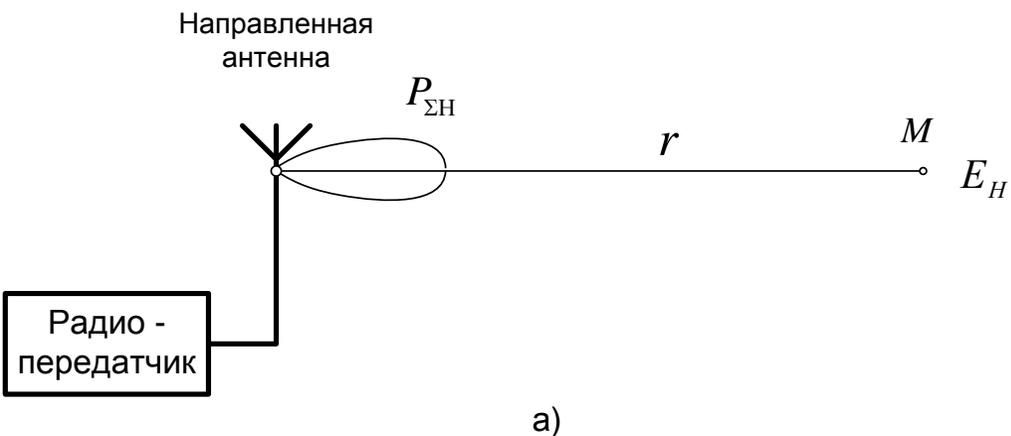
ШИРИНА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ (продолжение)



При этом на рис. а диаграмма направленности изображена в обычном относительном масштабе, а на рис. б – в логарифмическом (используется децибелльная мера). Следует обратить внимание на то, что при определении ширины главного лепестка по уровню половинной мощности $2\theta_{0,5}$ по диаграмме рис. б вдоль ограничивающих направлений уровень амплитуды напряженности электрического поля падает до -3 дБ от максимального значения 0 дБ. Это следует из простого соотношения $F(\theta)_{\text{дБ}} = 20\lg(0,707) = -3$ дБ.

Значение $2\theta_0$ на этой диаграмме направленности соответствует углу, ограничивающему главный лепесток по значениям $F(\theta)_{\text{дБ}} = 20\lg(0) = -\infty$. В тех случаях, когда провалы до нуля в диаграмме направленности отсутствуют, вместо ширины диаграммы направленности «по нулям» говорят о ширине диаграммы направленности по уровню $0,1$ мощности $2\theta_{0,1}$, т.е. $F^2(\theta) = 0,1$. В этом случае уровень диаграммы направленности по полю равен $F(\theta) = \sqrt{0,1} = 0,316$.

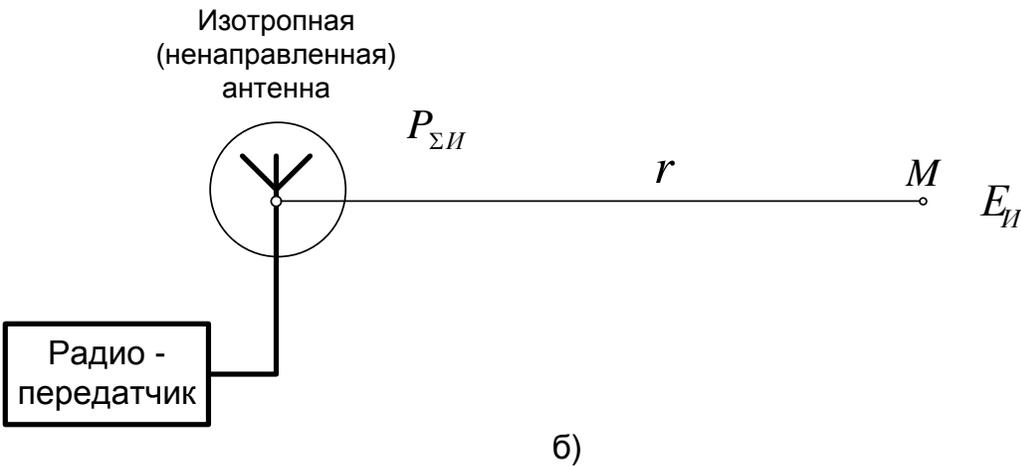
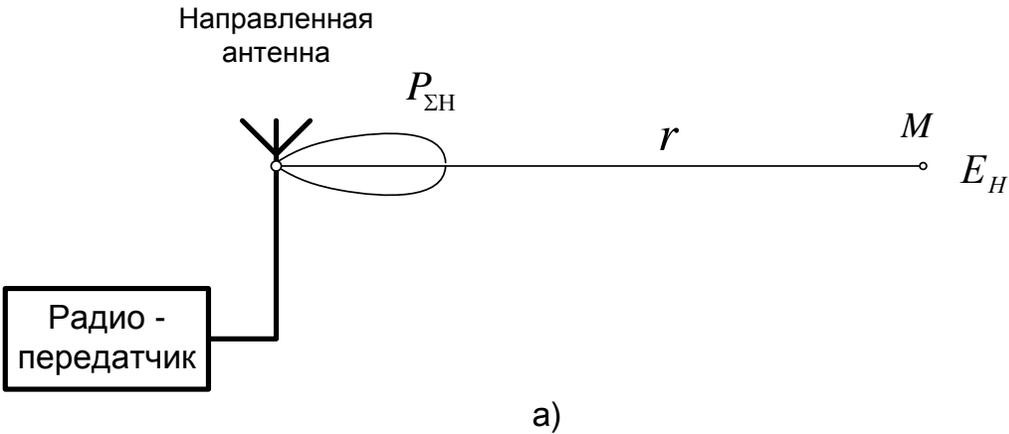
КОЭФФИЦИЕНТ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ



Пусть некоторый радиопередатчик работает на направленную антенну, амплитудная ДН которой отлична от сферы (сечение такой диаграммы показано на рис. а). Мощность, излучаемую этой антенной, обозначим $P_{\Sigma H}$, а напряженность поля в точке M , находящейся в направлении максимального излучения на расстоянии r от антенны — E_H .

Заменим направленную антенну на изотропную (воображаемую антенну, излучающую равномерно во все стороны). Сечение ДН изотропной антенны показано на рис. б. Мощность, излучаемую этой антенной, обозначим $P_{\Sigma И}$, а напряженность поля в точке M , находящейся на расстоянии r от антенны — $E_И$. Если обеспечить равенство значений излучаемых мощностей направленной и изотропной антенн $P_{\Sigma И} = P_{\Sigma H}$, то можно записать $\Pi_H > \Pi_И$. Поскольку плотность потока энергии прямо пропорциональна квадрату амплитуды напряженности электрического поля $\Pi \sim E^2$, то $E_H^2 > E_И^2$.

КОЭФФИЦИЕНТ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ (продолжение 1)



КНД (обозначим его D) есть число, показывающее во сколько раз квадрат напряженности электрического поля, создаваемого в точке M направленной антенной E_H^2 , превышает квадрат напряженности электрического поля, создаваемого в этой же точке M изотропной антенной $E_И^2$ при условии, что мощности излучения направленной и изотропной антенны равны $P_{\Sigma И} = P_{\Sigma H}$, то есть $D = E_H^2 / E_И^2$.

Возможен иной подход к определению КНД. Обеспечить равенство амплитуд напряженностей поля в точке M ($E_H = E_И$), создаваемых направленной (рис. а) и изотропной антеннами (рис. б), можно только за счет того, что будет выполняться условие $P_{\Sigma И} > P_{\Sigma H}$. Второе определение КНД — это число, показывающее во сколько раз пришлось бы увеличить мощность излучения $P_{\Sigma И}$ при переходе от направленной антенны к изотропной (ненаправленной) антенне при условии создания в точке M на одинаковом расстоянии r равных значений напряженности электрического поля ($E_H = E_И$), то есть $D = P_{\Sigma И} / P_{\Sigma H}$. Увеличение D передающей антенны эквивалентно возрастанию мощности радиопередатчика.

КОЭФФИЦИЕНТ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ (продолжение 2)

Для направления максимального излучения направленной антенны $D_{\text{макс}} = P_{\Sigma И} / P_{\Sigma Н} = 4\pi / \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F^2(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi$. Обычно всегда определяется КНД антенны для направления максимального излучения и для сокращения записи индекс «макс» опускается или вместо $D_{\text{макс}}$ пишется D_0 . Если же требуется определить значение КНД для любого направления, заданного углами θ и φ , то следует применить формулу $D(\theta, \varphi) = D_{\text{макс}} F^2(\theta, \varphi) = DF^2(\theta, \varphi) = D_0 F^2(\theta, \varphi)$. Так, например, если $D_{\text{макс}} = 100$, то в направлении излучения, где $F(\theta, \varphi) = 0,707$, по формуле получаем $D = 100 \cdot 0,707^2 = 100 \cdot 0,5 = 50$.

По определению КНД есть безразмерное число, определяемое как отношение значений двух величин, имеющих одинаковую размерность. Значения КНД реальных антенн могут быть от единиц до сотен, тысяч и даже миллионов. Часто значения КНД выражаются в децибелах $D_{\text{дБ}} = 10 \lg D$. Так, например, для $D = 10^6$ получаем $D_{\text{дБ}} = 10 \lg(10^6) = 60$ дБ.

АБСОЛЮТНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ

На практике чаще интересуются не КНД антенны, а её коэффициентом усиления. Объясняется это тем, что КНД не учитывает мощность потерь P_{Π} , а, следовательно, и КПД антенны η_a . Зависимость между коэффициентом усиления (обозначим его G), коэффициентом направленного действия D и коэффициентом полезного действия η_a определяется выражением $G = D \eta_a$.

Смысл этого параметра, учитывая данное выше определение КНД, заключается в следующем. Коэффициент усиления – это число показывающее во сколько раз квадрат напряженности электрического поля, создаваемого в точке M направленной антенной E_H^2 , превышает квадрат напряженности электрического поля, создаваемого в этой же точке M изотропной антенной $E_{\text{И}}^2$ при условии равенства мощностей, подводимых к обеим антеннам. При этом предполагается, что КПД изотропной антенны равен единице.

Возможно и другое определение коэффициента усиления, согласно которому этот коэффициент показывает, во сколько раз пришлось бы увеличить мощность, подводимую к антенне, при переходе от направленной антенны к изотропной антенне с КПД, равным единице, чтобы напряженность поля в данном направлении (при неизменном расстоянии до точки наблюдения M) осталась неизменной.

Приведенные определения справедливы для, так называемого, абсолютного коэффициента усиления.

КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ. ЭФФЕКТИВНО ИЗЛУЧАЕМАЯ МОЩНОСТЬ. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ИЗОТРОПНО ИЗЛУЧАЕМАЯ МОЩНОСТЬ

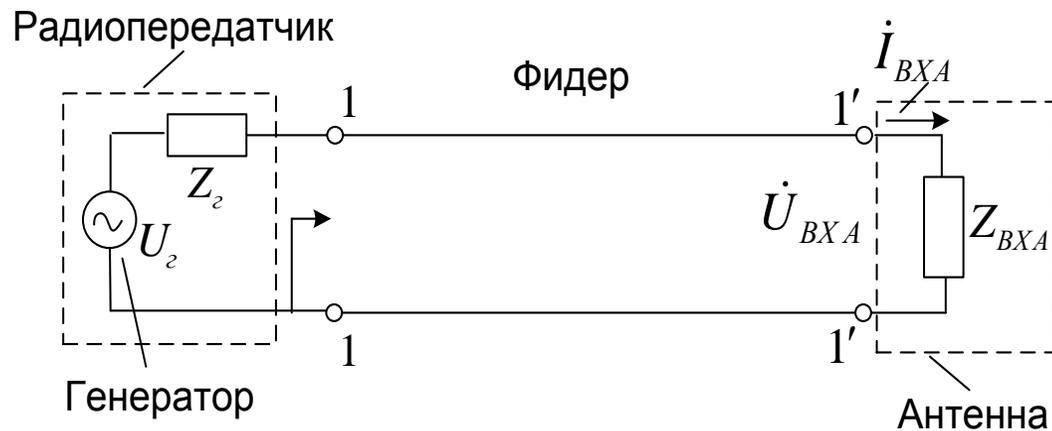
Наряду с понятием абсолютного коэффициента усиления существует понятие просто коэффициента усиления. Определение просто коэффициента усиления отличается тем, что реальная антенна сравнивается не с изотропной антенной, а с эталонной, например, линейным симметричным электрическим вибратором. В дальнейшем будем делать различие между абсолютным коэффициентом усиления и просто коэффициентом усиления только в тех случаях, когда это принципиально важно.

Выделение коэффициента усиления антенны, как самостоятельного параметра, связано с тем, что именно такая величина легко поддается непосредственному измерению методом сравнения. В этом методе используется эталонная антенна с известным значением коэффициента усиления.

Если коэффициент усиления передающей антенны задан по отношению к коэффициенту усиления полуволнового симметричного вибратора (диполя) без потерь, то он выражается в дБд. Если коэффициент усиления задан по отношению к коэффициенту усиления изотропного излучателя, то он выражается в дБи. Переход от дБд к дБи осуществляется с использованием известного факта теории антенн – значение коэффициента усиления антенны G , выраженное в дБд, на 2,15 дБ меньше, значения коэффициента усиления этой же антенны, выраженного в дБи, то есть $G, \text{дБи} - G, \text{дБд} = 2,15 \text{ дБ}$.

Произведение мощности на коэффициент усиления, измеренный по отношению к полуволновому симметричному вибратору (диполю), называют эффективно излучаемой мощностью ($PG, \text{Вт}$) или ($P, \text{дБВт} + G, \text{дБд}$). Если в произведении PG значение коэффициента усиления измерено относительно изотропного излучателя, то речь идет об эквивалентной изотропно-излучаемой мощности ($P, \text{дБВт} + G, \text{дБи}$).

ВХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

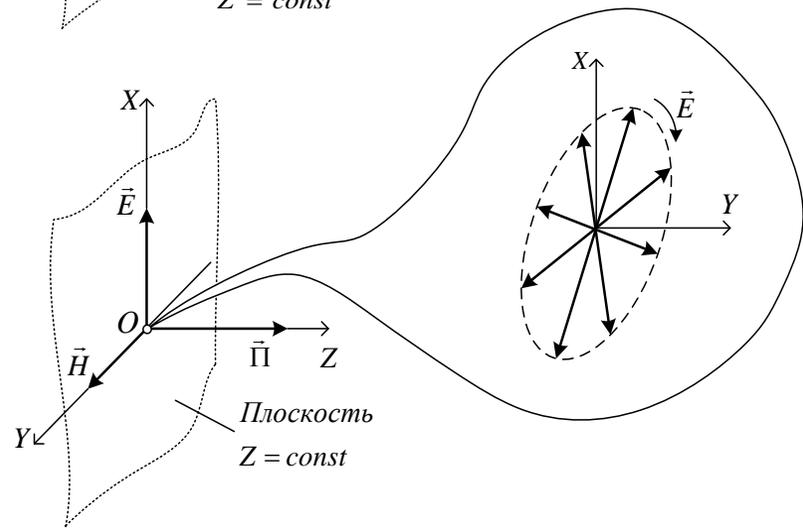
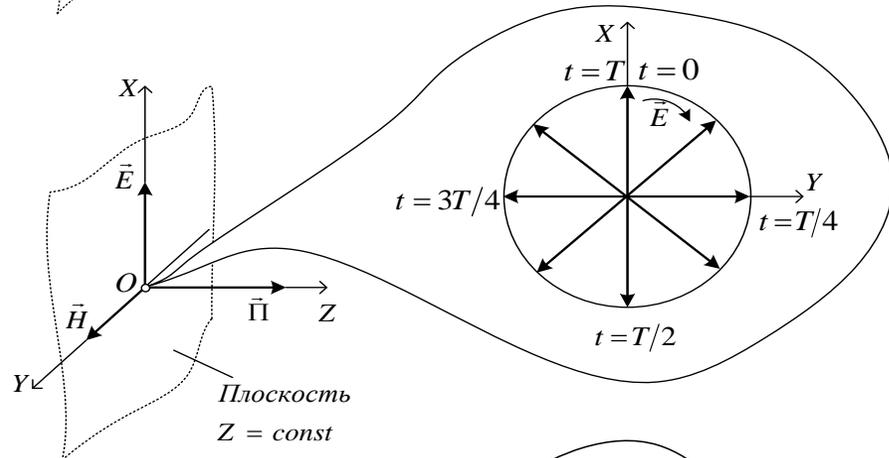
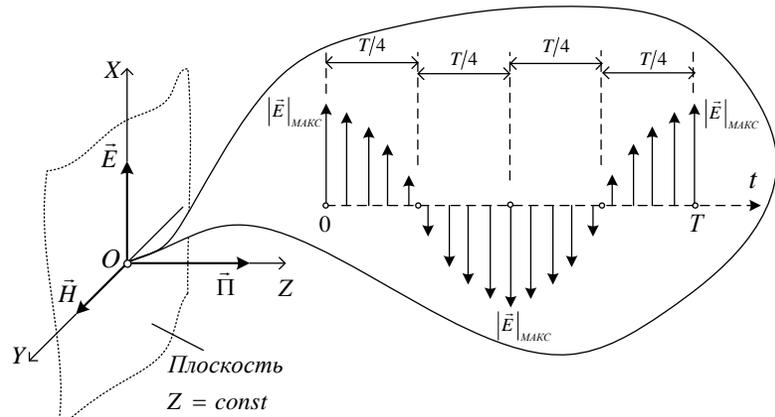


Передающая антенна представляет для фидера некоторую нагрузку, которая определяется отношением $Z_{BXA} = \dot{U}_{BXA} / \dot{I}_{BXA} = R_{BXA} + jX_{BXA}$. В общем случае входное сопротивление содержит как активную R_{BXA} , так и реактивную X_{BXA} составляющие, которые сложным образом зависят от частоты.

При наличии соответствующих измерительных приборов входное сопротивление можно определить путем измерения на определенной частоте или даже в полосе частот. Существенно сложнее определить входное сопротивление антенн, у которых фидер выполнен в виде волновода. О входном сопротивлении такой антенны можно судить лишь по тем отражениям, которые возникают на стыке фидера и антенны. Коэффициент отражения \tilde{p} выражается через входное сопротивление антенны Z_{BXA} и волновое сопротивление фидера W_Φ : $p = (Z_{BXA} - W_\Phi) / (Z_{BXA} + W_\Phi)$. Коэффициент отражения \tilde{p} в общем случае является комплексной величиной. Из выражения следует, что $Z_{BXA} = W_\Phi [(1 - \tilde{p}) / (1 + \tilde{p})]$.

Интерпретация входного сопротивления через коэффициент отражения является более общей, потому что, введение понятия тока \dot{I}_{BXA} , как и входного напряжения \dot{U}_{BXA} , в точках соединения фидера с передающей антенной не всегда физически возможно.

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА



Поляризационные свойства передающей антенны определяются по поляризации её поля излучения.

Линейная поляризация поля излучения обычно используется в системах, когда положение передающей и приемной антенны в пространстве не меняется, а среда не оказывает влияние на ориентацию плоскости поляризации, например, в наземном телевизионном вещании.

При осуществлении связи с движущимися объектами, например, со спутниками, целесообразно использовать круговую поляризацию.

Иногда в антеннах, предназначенных для излучения поля линейной поляризации, возникает паразитное излучение с ортогональной (поперечной) поляризацией. В этом случае различают основную или главную составляющую поляризации поля излучения и кросс-поляризационную (паразитную) составляющую.

ЭФФЕКТИВНАЯ ПЛОЩАДЬ

На практике широко используются радиосредства, оснащенные апертурными антеннами, у которых излучение энергии происходит через раскрыв, называемый апертурой (от латинского *aperture* – отверстие). В теории и практике применения излучающих структур хорошо известно соотношение для расчета КНД этого класса антенн:

$$D = (4\pi/\lambda^2)S\nu, \text{ где}$$

S — геометрическая площадь апертуры антенны;

ν — некоторый безразмерный коэффициент, называемый коэффициентом использования поверхности, численное значение которого для реальных антенн меньше единицы ($\nu < 1$).

Произведение $S\nu$ в формуле имеет размерность площади и называется эффективной площадью передающей антенны $S_{\text{э}}$. Таким образом $S_{\text{э}} = S\nu$.

Физический смысл параметра $S_{\text{э}}$ можно трактовать как площадь некоторой идеальной антенны, для которой коэффициент использования поверхности апертуры равен единице ($\nu = 1$).

ДЕЙСТВУЮЩАЯ ДЛИНА

На ранних этапах развития теории проволочных антенн, когда методы их инженерного расчета не были достаточно разработаны, делались попытки замены реальных антенн, выполненных из прямых проводов или труб, некоторой воображаемой эквивалентной проволочной антенной.

Эквивалентность реальной антенны и воображаемой оценивалась, исходя из условия равенства расчетных значений напряженности поля в направлении максимального излучения антенн в дальней зоне. При этом должны выполняться два дополнительных условия: первое — равенство токов на их зажимах, второе — фаза и амплитуда тока по длине эквивалентной антенны не меняются. Длина такой эквивалентной антенны и называется действующей длиной передающей антенны. Для реальных антенн всегда выполняется соотношение $l_D < l_p$, где l_D — действующая длина передающей антенны; l_p — длина реальной антенны.

Современная теория антенн располагает большими возможностями для расчета реальных передающих антенн без замены их эквивалентными. Таким образом, на сегодняшний день, параметр действующей длины l_D в анализе передающих антенн практически не используется.

МАКСИМАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ, ПОДВОДИМАЯ К ПЕРЕДАЮЩЕЙ АНТЕННЕ

При использовании антенны для излучения больших мощностей (десятки, сотни и тысячи киловатт) важно знать максимальную мощность, которую можно подводить к антенне. Эта мощность определяется электрической прочностью воздуха, окружающего антенну, и диэлектрических изоляторов, входящих в их конструкцию. Если амплитуда напряженности электрического поля вблизи проводов антенны превосходит 6...8 киловольт на сантиметр, то начинается процесс ионизации воздуха. В процессе ионизация молекул воздуха происходит излучение электромагнитных волн оптического диапазона. Вследствие этого ионизированный объем воздуха светится.

Напряженность электрического поля вдоль излучающих элементов антенны неодинакова. Это объясняется характером распределения тока (напряжения) вдоль излучающих элементов антенны, а также локальными неоднородностями конструкции (изгибы, выступы, скрутки и т.п.). Вследствие этого процесс ионизации начинается обычно не вдоль всех проводов антенны, а в определенных местах и сопровождается повышением температуры воздуха в этих местах. Столб ионизированного воздуха, как и обычное пламя, поднимается вверх, принимая форму факела. Отсюда термин — «факельное истечение». При наличии даже весьма слабого ветра образовавшийся факел перемещается в направлении движения воздуха. Факел, возникший на вертикальных или наклонных проводах, обычно передвигается вверх. Образование факельного истечения — верный признак перегрева проводов конструкции антенны. В конечном итоге отдельные провода могут расплавиться и сделать антенну неработоспособной. Таким образом, контроль максимальной мощности — это мероприятие, направленное на предотвращение возникновения факельного истечения.

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

С точки зрения экологии электромагнитное поле — это один из видов энергетического загрязнения среды. Наиболее интенсивными и распространенными источниками такого загрязнения являются радиосредства связи и вещания: радиопередающие станции наземной и спутниковой радиосвязи, радиовещания, телевизионного вещания, базовые станции сетей подвижной связи. Источниками электромагнитного загрязнения, строго говоря, являются передающие антенны радиосредств и, в существенно меньшей степени, их открытые фидеры.

Основными параметрами, характеризующими электромагнитную безопасность радиосредства, являются его санитарно-защитная зона (СЗЗ) и зона ограничения застройки (ЗОЗ).

Санитарно-защитная зона — это зона пространства, выделенная между радиосредством и селитебной территорией в целях охраны здоровья населения. Граница СЗЗ определяется на высоте двух метров от поверхности земли по факту превышения предельно допустимых уровней электромагнитного поля (напряженности электрического поля, напряженности магнитного поля или плотности потока энергии) или превышения критерия безопасности окружающей среды.

Зона ограничения застройки — это территория, где на высоте более двух метров от поверхности земли превышаются предельно допустимые уровни электромагнитного поля или критерий безопасности окружающей среды.

Расчет нормируемых параметров регламентируется государственными нормативными документами, например. На основе этого документа, а также аналогичных ему для антенн других частотных диапазонов, разработан специальный программный комплекс анализа электромагнитной обстановки.

РАБОЧАЯ ПОЛОСА (ДИАПАЗОН) ЧАСТОТ

Границы рабочей полосы частот определяются условием соответствия основных электрических параметров определенным техническим требованиям. В пределах диапазона частот $\Delta f = f_{\text{МАКС}} - f_{\text{МИН}}$ параметры антенны не должны выходить за пределы допусков, установленных техническими требованиями.

Границы рабочей полосы частот определяются тем параметром, значение которого при изменении частоты раньше других выходит из допустимых пределов. Очень часто критичным параметром является КБВ передающей антенны. Падение его значения ниже допустимого при изменении частоты и определяет границы диапазона антенны. Причиной падения КБВ является характер зависимости входного сопротивления антенны от частоты. В других случаях ограничение диапазона антенны может быть вызвано увеличением ширины диаграммы по уровню половинной мощности и падение коэффициента усиления, ростом уровня боковых лепестков, изменением направления максимального излучения, изменением поляризационных характеристик и т.д.

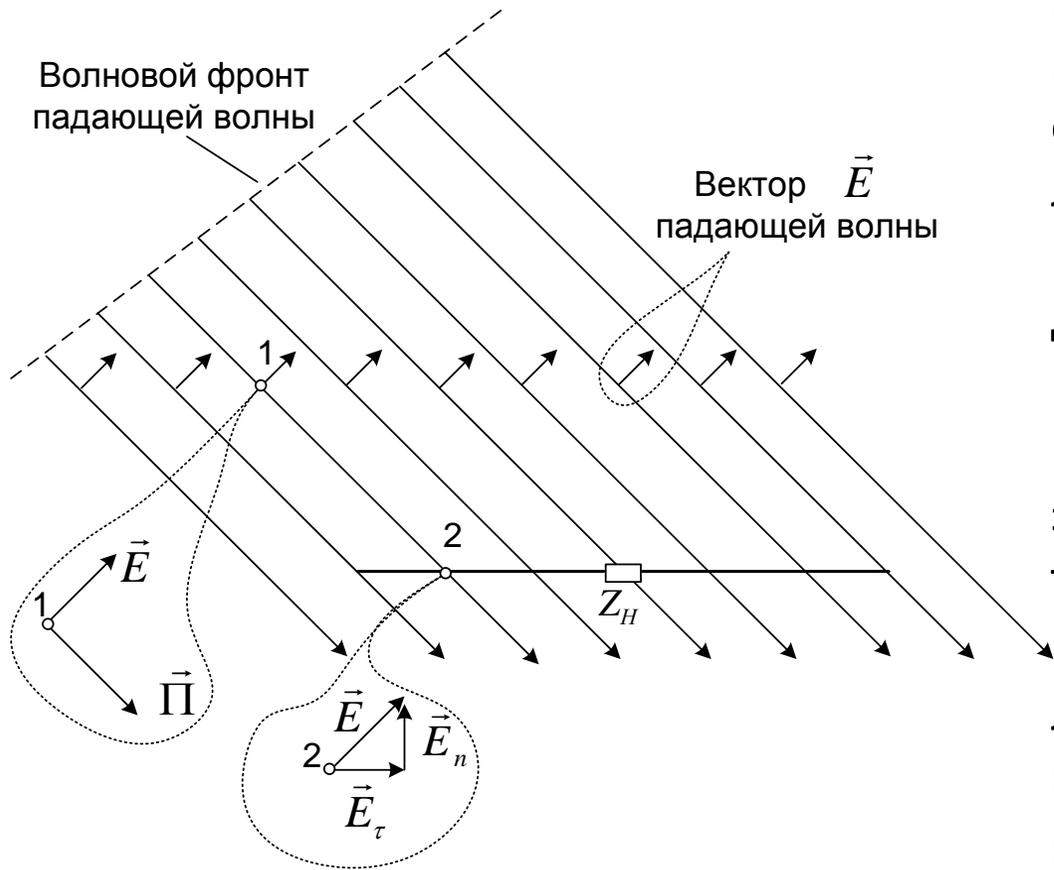
С точки зрения рабочей полосы частот различают антенны: настроенные, узкодиапазонные (узкополосные), широкодиапазонные (широкополосные) и сверхширокополосные.

Антенны, параметры которых соответствуют предъявляемым требованиям на одной рабочей частоте, называются настроенными. Основные параметры узкодиапазонных антенн сильно зависят от частоты. Вследствие этого они могут работать без перестройки только в узком диапазоне частот (относительная полоса частот $\Delta f / f_{\text{СР}}$ составляет менее 10 %).

Широкодиапазонные антенны работают без перестройки в широком диапазоне частот (относительная полоса частот находится в пределах от 10 % до 50 %).

Сверхширокополосные антенны обеспечивают соответствие параметров предъявляемым требованиям при коэффициенте перекрытия диапазона частот $f_{\text{МАКС}} : f_{\text{МИН}} = 5:1$ и более.

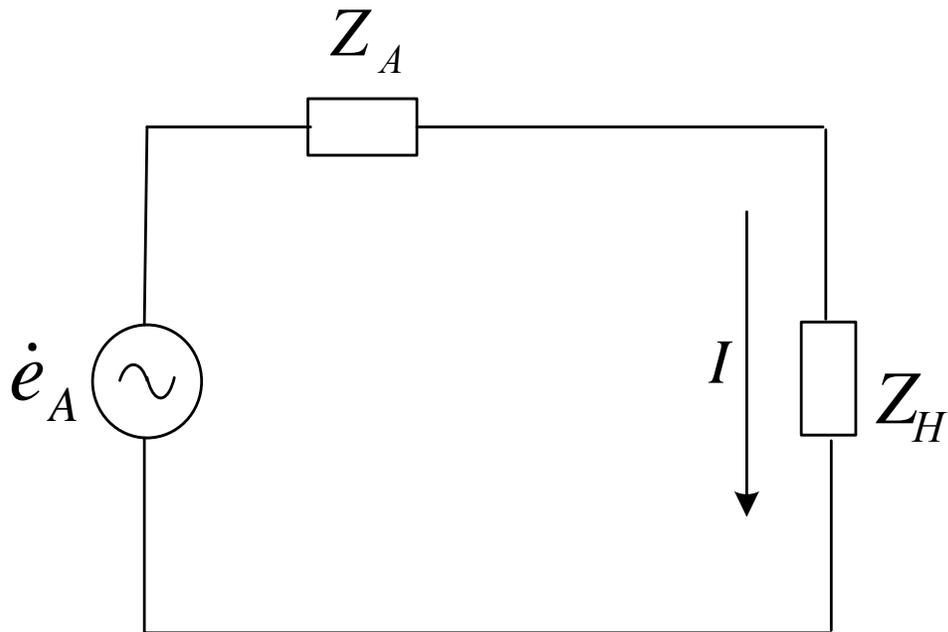
ПРОЦЕСС ПРИЕМА РАДИОВОЛН



Механизм процесса приема поясним на примере антенны, выполненной в виде прямолинейного провода, в середину которого включено сопротивление $Z_H = R_H + jX_H$. Это сопротивление соответствует сопротивлению входной цепи либо приемника, либо фидера с приемником на его конце. Поскольку источник падающей волны расположен обычно далеко от приемной антенны, можно считать, что её волновой фронт в окрестности приемной антенны является плоским. Пусть у падающей волны вектор напряженности электрического поля \vec{E} и вектор Пойнтинга $\vec{\Pi}$ ориентированы так, как это показано в точке 1. Заданная ориентация векторов сохраняется в любой точке пространства, включая любую точку на поверхности провода. Вектор \vec{E} падающей волны в одной из таких точек, например, точке 2, можно представить суммой двух векторов: касательного \vec{E}_τ к поверхности провода и нормального \vec{E}_n .

Под действием касательных составляющих \vec{E}_τ на каждом элементарном участке провода наводится электродвижущая сила (э.д.с.). Таким образом, по всей длине провода формируется распределенная э.д.с., под действием которой в проводе возникает продольный ток. Он является результатом суммарного действия э.д.с. всех элементарных участков. Этот ток вызывает полезное рассеивание энергии в нагрузке Z_H . Так осуществляется переход энергии от распространяющейся радиоволны к нагрузке.

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ПРИЕМНОЙ АНТЕННЫ



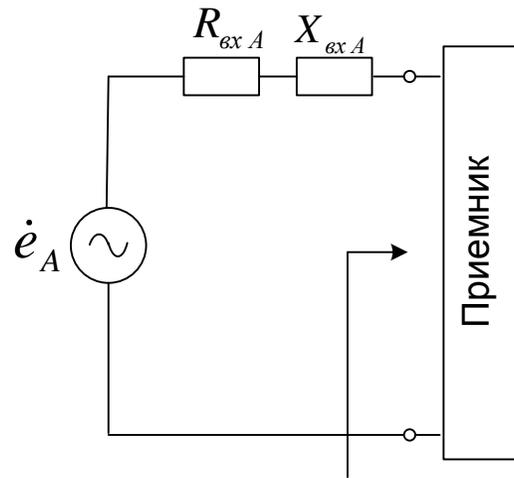
Основным вопросом при изучении приемных антенн является определение мощности, выделяемой в нагрузке приемной антенны, под действием падающей на антенну волны. Для этого необходимо, прежде всего, знать ток, возникающий в нагрузке. Значение его, естественно, зависит от ориентации антенны по отношению к падающей волне.

Приемная антенна) по отношению к сопротивлению нагрузки Z_H играет роль генератора, комплексная амплитуда э.д.с. \dot{e}_A которого создана под воздействием падающей волны и который имеет внутреннее сопротивление Z_A . Если значения \dot{e}_A и Z_A известны, то с помощью изображенной эквивалентной схемы легко определить комплексные амплитуды тока \dot{I} , напряжения \dot{U} и мощность P , отдаваемую в нагрузку $Z_H = R_H + jX_H$:

$$\dot{I} = \dot{e}_A / (Z_A + Z_H), \quad \dot{U} = \dot{e}_A [Z_H / (Z_A + Z_H)], \quad P = |\dot{I}|^2 R_H / 2.$$

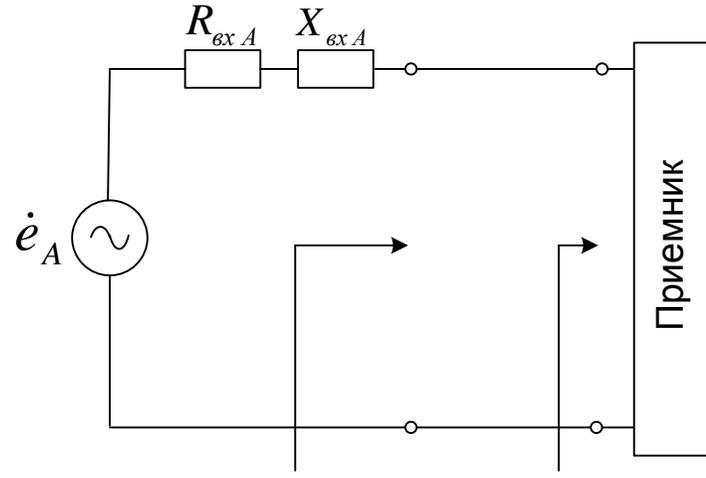
На основании теоремы об эквивалентном генераторе, внутреннее сопротивление антенны в режиме приема Z_A равно входному сопротивлению этой же антенны в режиме передачи $Z_{вхА}$. В общем случае оно содержит как активную, так и реактивную составляющие, $Z_{вхА} = R_{вхА} + jX_{вхА}$. Это сопротивление не зависит от подключенной нагрузки и характеризует собственно антенну.

СХЕМЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ПРИЕМНОЙ АНТЕННЫ К ПРИЕМНИКУ



Входное
сопротивление
приемника
 $Z_H = R_H + jX_H$

а)



Входное
сопротивление
фидера
Входное
сопротивление
приемника
 $Z_H = R_H + jX_H$

б)

Условия максимальной отдачи мощности в нагрузку, включенную в антенну, очевидно будут такими же, как и для любого генератора, т.е. максимальная отдача получится, когда $R_{вхА} = R_H$ и $X_{вхА} = -X_H$. Из формулы предыдущего слайда следует, что максимальная мощность, отдаваемая антенной в нагрузку, равна $P_{МАКС} = |\dot{e}_A|^2 / 8 R_{вхА}$.

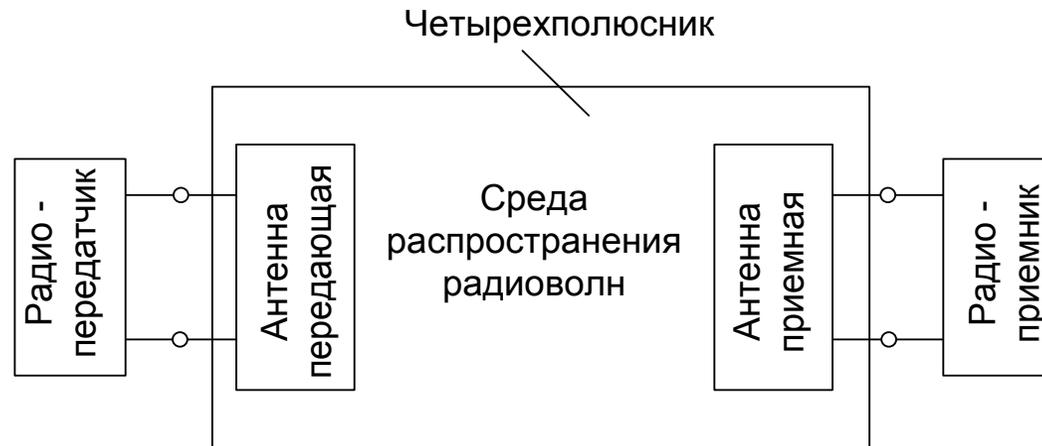
ХАРАКТЕРИСТИКА (ДИАГРАММА) НАПРАВЛЕННОСТИ

Рассмотренный принцип приема позволяет сделать вывод о том, что значение касательной составляющей \vec{E}_τ зависит от направления прихода плоской волны. Последнее, в свою очередь, означает, что комплексная амплитуда э.д.с. \dot{e}_A , комплексная амплитуда тока \dot{I} , комплексная амплитуда напряжения \dot{U} также зависят от направления прихода плоской волны. Если направление прихода плоской волны задать углами θ и φ , то можно говорить о модулях функций $\dot{e}_A(\theta, \varphi)$, $\dot{I}(\theta, \varphi)$ и $\dot{U}(\theta, \varphi)$, как амплитудных характеристиках направленности по э.д.с., току или напряжению (слово «амплитудная» в дальнейшем будем опускать). Нормированные характеристики направленности по э.д.с., току и напряжению одинаковы и определяются путем нормирования относительно их максимальных значений: $F(\theta, \varphi) = |\dot{e}_A(\theta, \varphi)|/|\dot{e}_{A \text{ МАКС}}| = |\dot{I}(\theta, \varphi)|/|\dot{I}_{\text{МАКС}}| = |\dot{U}(\theta, \varphi)|/|\dot{U}_{\text{МАКС}}|$. На практике обычно интересуются характеристикой направленности в какой-нибудь одной плоскости, в которой она является функцией одной переменной $F(\theta)$ или $F(\varphi)$.

Наряду с характеристиками направленности по э.д.с., току и напряжению, вводится понятие характеристики направленности приемной антенны по мощности, как зависимости мощности, выделяющейся на активной части сопротивления нагрузки R_H , от направления прихода волны. Эта мощность пропорциональна квадрату тока, поэтому, очевидно, что нормированная характеристика направленности по мощности является квадратом характеристики направленности $F^2(\theta, \varphi)$ и, соответственно, $F^2(\theta)$ или $F^2(\varphi)$.

Способы построения диаграмм направленности приемной антенны, определения ширины её диаграммы направленности и уровня боковых лепестков такие же, как и для антенны передающей.

ОБРАТИМОСТЬ ПРОЦЕССОВ ПРИЕМА И ИЗЛУЧЕНИЯ РАДИОВОЛН

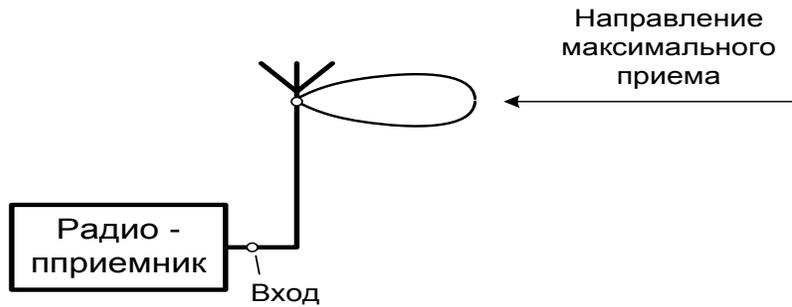


Радиолинию можно рассматривать как линейный четырехполюсник, у которого одна пара полюсов — зажимы передающей антенны, а другая пара — зажимы приемной антенны.

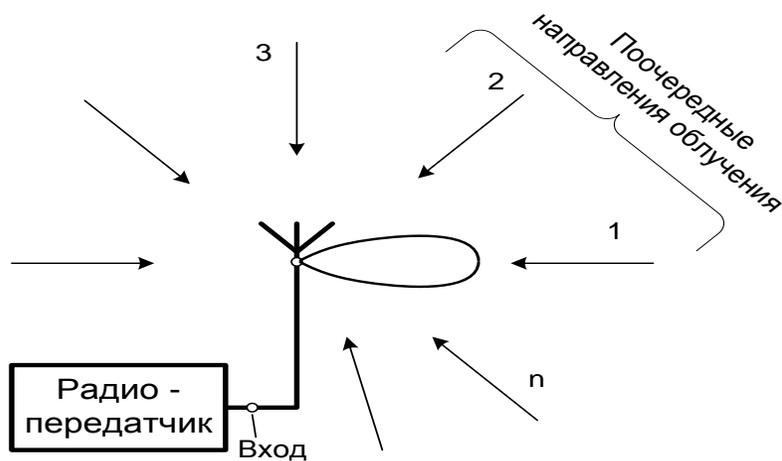
Для такого четырехполюсника справедлив принцип взаимности, который позволяет определить свойства и параметры приемной антенны, если известны свойства и параметры этой же самой антенны при работе её в качестве передающей. В частности, принцип взаимности позволяет доказать, что характеристика направленности любой приемной антенны совпадает с характеристикой направленности, получающейся при использовании её в качестве передающей, если радиоприемник (нагрузка) подключается к тем же зажимам, к которым был подключен радиопередатчик. Таким образом, из принципа взаимности вытекает обратимость процессов приема и передачи. Полное совпадение характеристик направленности антенны в режиме приема и режиме передачи имеет место только при согласовании поляризационных характеристик облучающего поля и приемной антенны в режиме передачи. Другими словами, если антенна при излучении создает поле определенной поляризации, она будет наиболее эффективно использоваться в режиме приема лишь при такой же поляризации.

КОЭФФИЦИЕНТ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ

Идентичность характеристик направленности одной и той же антенны при её применении либо в режиме приема, либо в режиме передачи предопределяет равенство значений коэффициентов направленного действия и коэффициентов усиления. Тем не менее, физический смысл этих параметров для приемной антенны следует пояснить. Коэффициент направленного действия приемной антенны при согласованном по поляризации приеме радиоволн - это отношение мощности, поступающей на вход приемника при облучении антенны с направления максимального приема, к средней по всем направлениям мощности, поступающей на вход приемника, если антенну облучать поочередно с разных направлений полем с неизменной амплитудой. Расчетные формулы для вычисления значений КНД приемных антенн те же самые, что и для антенн передающих.



а)



б)

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ И КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ

Под коэффициентом полезного действия η_a приемной антенны подразумевается коэффициент полезного действия этой же антенны при использовании её для передачи.

Коэффициент усиления G приемной антенны - это отношение мощности, поступающей на вход приемника при приеме на данную антенну, к мощности, поступающей на вход приемника при приеме на ненаправленную антенну с КПД равным единице. При этом предполагается, что обе антенны имеют оптимальное согласование с приемником и согласованы по поляризации с облучающим полем.

В области метровых, дециметровых, сантиметровых и более коротких волн в качестве эталонной антенны применяется изотропная антенна. В области декаметровых и более длинных волн в качестве эталонной антенны обычно применяется полуволновый линейный симметричный электрический вибратор, находящийся в свободном пространстве. При этом антенна и полуволновый вибратор должны находиться в неизменном (равномерном) поле, облучающем их с главного направления.

Формула $G = D \eta_a$ для передающих антенн, остается верной и для приемных антенн.

ЭФФЕКТИВНАЯ ПЛОЩАДЬ

Поле, облучающее приемную антенну, имеет интегральную характеристику — среднее (во времени) значение плотности потока энергии $|\vec{\Pi}_{\text{CP}}|$. Приемная антенна извлекает часть энергии облучающего поля, преобразуя её в мощность P , которая выделяется в сопротивлении нагрузки. Между величинами P и $|\vec{\Pi}_{\text{CP}}|$ существует связь $P = S_{\text{Э}}|\vec{\Pi}_{\text{CP}}|$.

Коэффициент пропорциональности между P и $|\vec{\Pi}_{\text{CP}}|$ называется эффективной площадью приемной антенны. $S_{\text{Э}}$ является параметром приемной антенны — это площадь, численно равная отношению максимальной мощности, которая может быть отдана приемной антенной без учета потерь в согласованную нагрузку, к средней плотности потока энергии облучающей плоской радиоволны. Не следует думать, что для приемной антенны, имеющей реальный раскрыв (апертуру), через который происходит прием радиоволн, его геометрическая площадь S будет равна эффективной площади $S_{\text{Э}}$. Как правило, $S_{\text{Э}} < S$, а их отношение, называется коэффициентом использования поверхности апертуры $\nu = S_{\text{Э}}/S$. Он показывает, какая доля энергии, падающей на раскрыв S , преобразуется в мощность, выделяющуюся в нагрузке приемной антенны. Численные значения эффективной площади одной и той же антенны при её работе в приемном и передающем режимах одинаковы.

ДЕЙСТВУЮЩАЯ ДЛИНА

Действующей длиной l_D приемной антенны называется отношение э.д.с., наводимой в антенне радиоволной, приходящей с направления главного лепестка диаграммы направленности приемной антенны, к напряженности поля в месте приема.

Наведенная э.д.с. является распределенной по длине антенны. На эквивалентной схеме приемной антенны действие распределенной э.д.с. заменялось сосредоточенной эквивалентной э.д.с. \dot{e}_A . Таким образом, в соответствии с приведенным определением действующей длины приемной антенны, можно записать

$l_D = |\dot{e}_A| / \left| \vec{E} \right|$. В этой формуле $\left| \vec{E} \right|$ модуль комплексной амплитуда напряженности электрического поля волны, облучающей приемную антенну с направления максимального приема. Обязательное условие — согласованность приемной антенны с облучающим полем по поляризации.

Численные значения действующей длины одной и той же антенны при её работе в приемном и передающем режимах одинаковы.

ШУМОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Важнейшим параметром приемной антенны, которым обычно не интересуются при работе антенны в режиме передачи, является её шумовая температура T_A , измеряемая по абсолютной шкале в градусах Кельвина. Шумовая температура характеризует мощность шумов $P_{\text{ш}}$ на сопротивлении нагрузки приемной антенны в полосе частот Δf , в отсутствии полезного сигнала $P_{\text{ш}} = kT_A \Delta f$, Вт, где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$, Вт/(Гц · К) — постоянная Больцмана. Шумы, возникающие на сопротивлении нагрузки антенны, складываются из внутренних и внешних шумов. Соответственно полная шумовая температура антенны складывается из шумовой температуры, определяемой внешними шумами (помехами) $T_{A\Sigma}$, и собственной шумовой температуры антенны T_{AC} , определяемой тепловыми потерями в материале конструкции антенны $T_A = T_{A\Sigma} + T_{AC}$. Собственная шумовая температура, связанная с потерями, T_{AC} определяется по известному коэффициенту полезного действия приемной антенны η_a и физической температуре антенны в Кельвинах T_0 $T_{AC} = (1 - \eta_a)T_0$. Внешние шумы (помехи), проявляющиеся на сопротивлении нагрузки, возникают в результате приема антенной энергии радиоизлучений от источников различной природы из окружающего пространства, в первую очередь, от Солнца, звезд, атмосферы Земли, земной поверхности и др. Шумовую температуру, определяемую внешними шумами (помехами), $T_{A\Sigma}$ иногда называют эквивалентной шумовой температурой антенны. Её обычно определяют как абсолютную температуру сопротивления, равного входному сопротивлению антенны и выделяющего на сопротивлении нагрузки ту же мощность, что и рассматриваемые источники внешних шумов (помех). Шумовая температура $T_{A\Sigma}$ зависит от диаметра антенны и угла места. Как правило, значение шумовой температуры конкретной антенны указывается в спецификации для одного или нескольких значений угла места.