

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

| | |
|-------|---------------------------------------|
| ААР — | адаптивная антенная решетка |
| АР — | антенная решетка |
| АФУ — | антенно-фидерное устройство |
| ВЩА — | волноводно-щелевая антенна |
| ДН — | диаграмма направленности |
| ДОС — | диаграммообразующая схема |
| ЗА — | зеркальные антенны |
| КБВ — | коэффициент бегущей волны |
| КИП — | коэффициент использования площади |
| КНД — | коэффициент направленного действия |
| КПД — | коэффициент полезного действия |
| ЛПА — | логарифмически периодическая антенна |
| НСВ — | несимметричный вибратор |
| ПЭ — | поляризационный эллипс |
| ПХ — | поляризационная характеристика |
| РЛС — | радиолокационная станция |
| РПУ — | радиоприемное устройство |
| РСН — | равносигнальное направление |
| РТС — | радиотехнические системы |
| РЭС — | радиоэлектронные средства |
| СВ — | симметричный вибратор |
| СУЛ — | схема управления лучом |
| ФАР — | фазированная антенная решетка |
| ФВ — | фазовращатель |
| ЩА — | щелевая антенна |
| ЭМВ — | электромагнитная волна |
| ЭМП — | электромагнитное поле |
| ЭПР — | эффективная площадь раскрытия антенны |

ВВЕДЕНИЕ

Основными структурными составляющими средств радиосвязи, как правило, являются радиопередающее устройство, радиоприемное устройство и антенно-фидерный тракт.

Современные достижения в технике антенн основываются на последних разработках электроники, техники полупроводников, когерентной радиооптики, оптоэлектроники и т. д. Различные объекты — наземные стационарные и мобильные пункты управления, воздушные суда, средства обеспечения полетов авиации и другие имеют множество антенн различных диапазонов и назначений, и обеспечение их электромагнитной совместимости во многом зависит от характеристик и параметров антенн. В связи с этим специалист, обеспечивающий эксплуатацию техники связи, должен обладать знаниями основ теории антенн, а также их характеристик и параметров. Эти вопросы рассматриваются в настоящем учебном пособии.

Усвоение изложенных в пособии вопросов предполагает знание читателем общих разделов высшей математики, теории радиотехнических цепей и сигналов, электродинамики и распространения радиоволн в рамках существующих учебных программ.

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕДАЮЩИХ АНТЕНН

1.1. НАЗНАЧЕНИЕ ПЕРЕДАЮЩИХ АНТЕНН И ИХ ФУНКЦИИ

Антенна является неотъемлемой составной частью любого радиотехнического устройства, которое предназначено для передачи или приема информации с помощью радиоволн через окружающее пространство.

Передающая антенна предназначена для непосредственного излучения радиоволн. Она решает следующие задачи:

- 1) преобразование энергии токов высокой частоты в энергию излучаемых радиоволн. Одним из основных требований, предъявляемых к антеннам, является сохранение закона модуляции (отсутствие искажения передаваемой информации);
- 2) пространственное распределение энергии электромагнитного поля;
- 3) формирование определенной поляризационной структуры поля.

Классификация антенн

1. *По функциональному назначению*: приемные, передающие, прямо-передающие.

2. *По конструкции и принципу действия*: линейные, апертурные, антенные решетки.

Антенны *линейного типа* характерны тем, что размеры поперечного сечения у них малы по сравнению с длиной волны. Обычно такие антенны выполняются из отрезка провода или нескольких проводов либо в виде стержня.

Апертурные антенны имеют раскрыв (апертуру), через который проходит поток излучаемой (принимаемой) энергии.

В свою очередь, линейные и апертурные антенны могут быть представлены как непрерывные системы, состоящие из элементарных излучателей: диполей (вибраторов) Герца, элементарных рамок или источников Гюйгенса.

Антенная решетка (АР) — это совокупность идентичных излучающих (приемных) элементов, расположенных в определенном порядке и питаемых от одного или нескольких когерентных источников.

3. *По поляризации*: антенны с линейной поляризацией, антенны с вращающейся поляризацией.

4. *По полосе пропускания*: узкополосные, широкополосные, широкодиапазонные.

5. *По диапазону радиоволн*: антенны диапазона ОВЧ (МВ), антенны диапазона УВЧ (ДМВ), антенны диапазона СВЧ (СМВ), антенны диапазона КВЧ (ММВ).

6. *По направленным свойствам*: ненаправленные, узконаправленные.

7. *По месту установки*: наземные (стационарные), бортовые (подвижные).

8. *По назначению радиотехнических устройств*: связные, навигационные, радиолокационные и т. д.

1.2. ПЕРЕДАЮЩАЯ АНТЕННА КАК НАГРУЗКА ДЛЯ ГЕНЕРАТОРА, ЕЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Для оценки качества антенн и сравнения их между собой используют характеристики и параметры. Параметры антенн представляют собой определенные числовые величины, а характеристики дают некоторую функциональную зависимость.

Так как антенны обладают способностью преобразовывать энергию направляемых электромагнитных волн (ЭМВ) в энергию радиоволн (или наоборот), то существует ряд показателей, которые по своей сути для них являются *энергетическими параметрами*. К ним относятся: мощ-

ность излучения P_Σ , сопротивление излучения R_Σ , коэффициент полезного действия (КПД) η_A , входное сопротивление антенны \dot{Z}_A , действующая длина l_d , эффективная площадь раскрыва (ЭПР) $A_{\text{эфф}}$, коэффициент использования площади (КИП) q .

В режиме передачи (излучения) антенна является нагрузкой генератора токов высокой частоты. Как нагрузка, она характеризуется активной, реактивной и предельной мощностью, а также входным сопротивлением. Для получения наибольшей мощности излучения антенна должна быть согласована с линией передачи и внутренним сопротивлением генератора.

Эквивалентная схема передающей антенны представлена на рисунке 1.1.

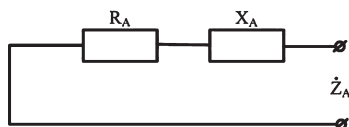


Рис. 1.1
Эквивалентная схема
передающей антенны

Входное сопротивление

антенны — это комплексная величина, равная отношению комплексных амплитуд (или действующих значений) напряжения и тока на входе антенны:

$$\dot{Z}_A = \frac{\dot{U}_{\text{Авх}}}{\dot{I}_{\text{Авх}}} = R_A + jX_A, \quad (1.1)$$

где R_A и X_A — активная и реактивная составляющие входного сопротивления соответственно.

Входное сопротивление антенны как параметр относится к антеннам только *линейного типа*, у которых комплексное напряжение и ток на входе антенны физически определены и могут быть непосредственно измерены. Для антенн *апертурного типа* понятие входного сопротивления неприемлемо, так как у них нет входных зажимов.

В общем случае входное сопротивление антенны зависит от частоты генератора сложным образом. Кроме того, на него оказывают влияние посторонние проводники и другие тела, расположенные вблизи антенны. Поэтому на практике входное сопротивление антенны определяют на заданных частотах с помощью измерительных приборов.

Подводимая к антенне мощность генератора расходуется на излучение, потери в антенне и окружающих ее телах и среде, а также на создание реактивных полей в ближней зоне, поэтому R_A характеризует мощность излучения антенны и мощность тепловых потерь в антенне и в окружающих ее телах и среде:

$$R_A = R_\Sigma + R_{\Pi}, \quad (1.2)$$

где R_Σ — сопротивление излучения; R_{Π} — сопротивление потерь.

Сопротивление излучения — это некоторое воображаемое активное сопротивление, на котором выделяется мощность, равная мощности излучения антенны:

$$P_\Sigma = \frac{I_A^2 \cdot R_\Sigma}{2}, \quad (1.3)$$

где I_A — амплитуда тока на входных зажимах антенны. Сопротивление излучения характеризует излучающие свойства передающей антенны. Величина X_A характеризует собой реактивную мощность в ближней зоне, которая не излучается.

Как сопротивление излучения, так и реактивное сопротивление антенны зависит от типа антенны, ее конструктивного исполнения, а также от длины волны. Сопротивление потерь зависит от проводящих свойств металла, из которого изготовлена антенна, качества изоляторов, а также от окружающих антенну тел и среды.

Мощность излучения антенны — это та часть мощности, подводимой к антенне от генератора, которая преобразуется антенной в радиоволны и достигает дальней зоны. Ее можно определить путем интегрирования плотности потока мощности этой антенны по замкнутой поверхности S , охватывающей некоторый объем пространства, окружающего антенну:

$$P_\Sigma = \oint_S \Pi dS, \quad (1.4)$$

где $\Pi = \Pi(\theta, \varphi)$ — плотность потока мощности (или модуль среднего значения вектора Умова — Пойнтинга).

Так как

$$\Pi(\theta, \varphi) = \Pi_{\max} \cdot F^2(\theta, \varphi); \quad \Pi_{\max} = E_{\max}^2 / 240\pi,$$

то

$$\Pi(\theta, \varphi) = \frac{E_{\max}^2 \cdot F^2(\theta, \varphi)}{240\pi}, \quad (1.5)$$

где $F^2(\theta, \varphi)$ — диаграмма направленности (ДН) антенны по мощности.

В качестве простейшей поверхности интегрирования удобно выбрать сферу с радиусом r (рис. 1.2). Элемент площади dS на сферической поверхности (результат сечения поверхности сферы двумя меридиональными и двумя азимутальными плоскостями), как это видно из рисунка, равен

$$dS = r^2 \sin(\theta) \cdot d\varphi \cdot d\theta. \quad (1.6)$$

Подставляя в (1.4) выражения (1.5) и (1.6), можно получить

$$P_{\Sigma} = \frac{r^2 \cdot E_{\max}^2}{240\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} F^2(\theta, \varphi) \cdot \sin(\theta) \cdot d\varphi \cdot d\theta. \quad (1.7)$$

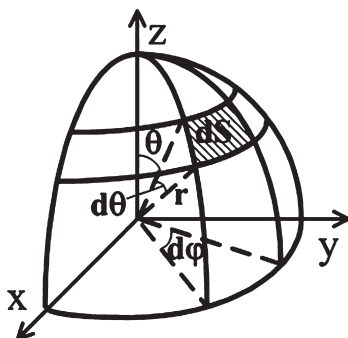


Рис. 1.2

Поверхность интегрирования в сферической системе координат

Таким образом, для определения мощности излучения необходимо знать нормированную ДН по мощности и напряженность поля в направлении максимального излучения при заданном расстоянии r . Мощность излучения антенны зависит от мощности генератора, условий согласования, а также от излучающей способности антенны. Эта способность зависит от типа антенны, особенностей конструктивного исполнения, размеров антенны по отношению к длине волны.

Антенна, как любой преобразователь энергии, характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД).

Коэффициент полезного действия — это отношение мощности излучения ко всей активной мощности, получаемой антенной:

$$\eta_A = \frac{P_\Sigma}{P_A} = \frac{P_\Sigma}{P_\Sigma + P_\Pi} = \frac{R_\Sigma}{R_\Sigma + R_\Pi} < 1. \quad (1.8)$$

Отсюда следует, что для увеличения КПД антенны необходимо уменьшать сопротивление потерь и увеличивать сопротивление излучения антенны. КПД современных антенн различных диапазонов и типов весьма широк: от 25 до 95%.

Действующая длина передающей антенны — это коэффициент, имеющий размерность длины и связывающий между собой амплитуду напряженности поля в точке, находящейся в дальней зоне в направлении максимума излучения передающей антенны, с максимальным напряжением на зажимах антенны:

$$U_{A\max} = l_d \cdot E_{\max}. \quad (1.9)$$

Этот параметр относится *только к антеннам линейного типа* и характеризует их энергетическую эффективность по преобразованию энергии токов высокой частоты в линии передачи в энергию электромагнитного поля (ЭМП) излучаемой волны. Действующая длина передающей антенны зависит от ее геометрической длины и от закона распределения амплитуды и фазы тока вдоль антенны $\dot{I}(z)$:

$$l_d = \frac{1}{I_A} \cdot \int_{z=0}^l \dot{I}(z) \cdot dz. \quad (1.10)$$

Из выражения (1.10) следует:

- при равномерном и синфазном законе распределения тока по антенне ($\dot{I}(z) = I_A = \text{const}$) действующая длина антенны совпадает с геометрической $l_d = l$;
- чем более неравномерно и не синфазно распределение тока вдоль антенны, тем меньший процент от геометрической длины антенны составляет действующая длина. Поэтому в общем случае действующая длина лежит в пределах от нуля до геометрической длины: $0 < l_d < l$.

Физический смысл действующей длины передающей антенны. Это такая геометрическая длина линейной антенны с равномерным и синфазным распределением тока вдоль нее, при котором эта антенна создает в точке, находящейся в дальней зоне по направлению максимума излучения, такую же напряженность поля, как и реальная антенна с неравномерным и несинфазным распределением тока по длине. В свою очередь, закон распределения тока вдоль передающей антенны зависит от типа антенны и ее конструктивного исполнения.

Эффективная площадь раскрыва передающей антенны (ЭПР) — это коэффициент, имеющий размерность площади, который связывает между собой плотность потока мощности, создаваемой передающей антенной в точке пространства, находящейся в дальней зоне в направлении максимума излучения, и активную мощность, подводимую к антенне от генератора:

$$P_{A_{\max}} = A_{\text{эфф}} \cdot \Pi_{\max}. \quad (1.11)$$

Этот параметр относится *только к антеннам апертурного типа* и характеризует их энергетическую эффективность по преобразованию энергии токов высокой частоты в линии передачи в энергию излучаемой волны. Эффективная площадь передающей антенны зависит от ее геометрической площади и от закона распределения амплитуды и фазы поля по раскрытию антенны $\dot{E}_S(x, y)$:

$$A_{\text{эфф}} = \frac{\left| \int_s \dot{E}_S(x, y) dS \right|^2}{\int_s |\dot{E}_S(x, y)|^2 dS}. \quad (1.12)$$

Из выражения (1.12) следует:

- при равномерном и синфазном законе распределения поля в раскрытии апертурной антенны ($\dot{E}_S(x, y) = E_0$) эффективная площадь раскрыва совпадает с его геометрической площадью;
- чем больше неравномерность и несинфазность в распределении поля по раскрытию, тем меньший процент

от геометрической площади раскрыва антенны составляет эффективная. Поэтому в общем случае эффективная площадь лежит в пределах от нуля до геометрической площади раскрыва: $0 < A_{\text{эфф}} < S$.

Физический смысл эффективной площади раскрыва передающей антенны.

Это такая геометрическая площадь раскрыва апертурной антенны с равномерным и синфазным распределением поля в ее раскрыве, при котором эта антенна создает в точке, находящейся в дальней зоне по направлению максимума ДН, такую же плотность потока мощности, как и реальная антенна с неравномерным и несинфазным распределением поля в ее раскрыве. Величина, равная отношению ЭПР к геометрической площади раскрыва антенны, называется коэффициентом использования площади (КИП):

$$q = \frac{A_{\text{эфф}}}{S} \leq 1. \quad (1.13)$$

Этот коэффициент характеризует эффективность использования площади раскрыва апертурной антенны при излучении энергии электромагнитного поля и учитывает несинфазность и неравномерность возбуждения поверхности раскрыва.

1.3. ДИАПАЗОННЫЕ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПЕРЕДАЮЩИХ АНТЕНН

Диапазоном рабочих частот (полосой пропускания) антенны называется интервал частот от f_{\min} до f_{\max} , в пределах которого все параметры антенны не выходят из заданных пределов:

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min}. \quad (1.14)$$

Диапазон рабочих частот антенны чаще всего выражают в процентах к средней частоте диапазона:

$$\frac{\Delta f}{f_{\text{cp}}} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\max} + f_{\min}} \cdot 2 \cdot 100\%. \quad (1.15)$$

Если $\Delta f/f_{\text{ср}} < 10\%$, то антенна — узкополосная.

Если $10\% < \Delta f/f_{\text{ср}} < 100\%$, то антенна — широкополосная.

Если $\Delta f/f_{\text{ср}} > 100\%$, то антенна — широкодиапазонная.

Диапазон рабочих частот широкодиапазонных антенн оценивают специальным параметром — коэффициентом перекрытия диапазона $K_d = f_{\text{max}}/f_{\text{min}}$.

В зависимости от типа антенны, характеристики и параметры, наиболее критичные к изменению частоты, будут различными. Так, например, для линейных антенн это входное сопротивление, для антенных решеток — как входное сопротивление, так и направление максимума главного лепестка ДН.

Под поляризацией ЭМВ понимают ориентацию в пространстве вектора напряженности электрического поля относительно линии горизонта. При этом следует иметь в виду, что ЭМП в пространстве является разделенным, отсюда и термин — «поляризация». Так как магнитная составляющая поля всегда располагается в плоскости, перпендикулярной электрической, то о ней в дальнейшем можно и не говорить.

Плоскость, проходящую через вектор \vec{E} , и направление распространения волны (вектор $\vec{\Pi}$), называют *плоскостью поляризации*, а плоскость, проходящую через векторы \vec{E} и \vec{H} , — *картинной плоскостью* (рис. 1.3).

Различают следующие **виды поляризации**:

- *линейная поляризация*, если плоскость поляризации не меняет своего положения в пространстве. Линейная поляризация может быть вертикальной, горизонтальной и наклонной;
- *вращающаяся поляризация*, если плоскость поляризации вращается вместе с вектором вокруг направления распространения с частотой колебаний ЭМП, т. е. делает один оборот за период колебаний.

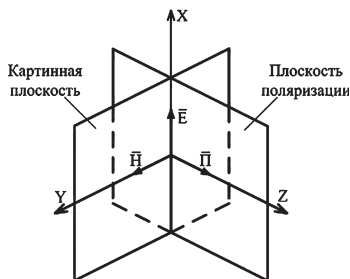


Рис. 1.3
Составляющие ЭМП

При распространении ЭМВ с вращающейся поляризацией вектор \vec{E} вращается с угловой скоростью $\omega = 2\pi f$, совершая за один период высокочастотного колебания один оборот, и может изменять свою

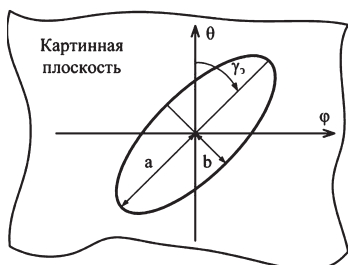


Рис. 1.4
Эллипс поляризации

величину по гармоническому закону. При этом проекция конца вектора \vec{E} на картинную плоскость будет описывать в ней эллипс (рис. 1.4).

Поляризационным эллипсом (ПЭ) называют геометрическое место точек, которые являются проекциями конца вектора \vec{E} на картинную плоскость за один его

оборот. Поляризация поля, излучаемого антенной, соответствующая этому случаю, называется эллиптической.

Поляризационный эллипс характеризуется следующими параметрами:

- *коэффициентом эллиптичности*, равным отношению малой оси эллипса к большой, $K_э = b/a$. В общем случае при эллиптической поляризации коэффициент эллиптичности зависит от угловых координат точки наблюдения, т. е.

$$K_э = K_э(\theta, \varphi); \quad (1.16)$$

- *углом наклона поляризационного эллипса*, т. е. углом между большой осью эллипса и вертикальной осью выбранной системы координат γ_3 ;
- *направлением вращения вектора \vec{E}* , которое определяется, глядя вслед уходящей волне. При этом под поляризацией правого вращения подразумевают вращение вектора \vec{E} по часовой стрелке, тогда коэффициент эллиптичности принимает положительные значения, $0 < K_э < 1$. При поляризации левого вращения (вектор вращается против часовой стрелки) коэффициент эллиптичности отрицателен, $-1 < K_э < 0$. При $K_э = 0$ эллипс вырождается в прямую линию и поле имеет линейную поляризацию.

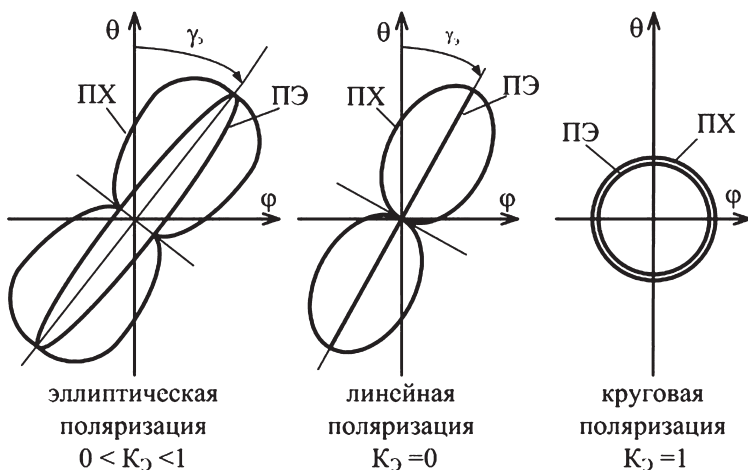


Рис. 1.5

ПХ антенн для различных видов поляризации

Поляризационная характеристика (ПХ) — это зависимость ЭДС в приемной антенне с линейной поляризацией, принимающей ЭМВ рассматриваемой передающей антенны, от угла ее поворота в картинной плоскости. Таким образом, поляризационный эллипс вписан в ПХ. На рисунке 1.5 представлены поляризационные характеристики антенн для различных видов поляризации.

1.4. ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ПЕРЕДАЮЩЕЙ АНТЕННЫ

На практике любой антенне присуще свойство концентрации энергии излучаемых ею ЭМВ в определенной области пространства (фокусирование энергии радиоволн). Для описания направленных свойств антенны используют специальные характеристики и параметры. К таким характеристикам относятся диаграммы направленности (ДН) передающей антенны по напряженности поля и плотности потока мощности, а к параметрам — ширина диаграммы направленности, уровень боковых лепестков ДН, коэффициент направленного действия (КНД) и коэффициент усиления (КУ).

Понятие о ДН передающей антенны вводится с целью выяснения проблемы о распределении в пространстве энергии, излучаемой антенной. При этом различают *ДН по напряженности поля* или *по мощности*. Но следует заметить, что они между собой жестко связаны.

ДН по напряженности поля — это зависимость амплитуды напряженности электромагнитного поля, излучаемого антенной, от угловых координат в пространстве при одинаковом расстоянии до нее. Причем выбор расстояния ограничен требованием нахождения измерителя в дальней зоне (зоне излучения) антенны:

$$r \gg \frac{(2L_A^2)}{\lambda}, \quad (1.17)$$

где L_A — наибольший габаритный размер антенны.

Ненормированная ДН обозначается следующим образом:

$$\begin{aligned} E &= E(\theta, \varphi) = F^E(\theta, \varphi); \\ H &= H(\theta, \varphi) = F^H(\theta, \varphi) \quad \text{при } r = \text{const}, \end{aligned} \quad (1.18)$$

где θ , φ и r — координаты точки наблюдения в сферической системе координат (рис. 1.2).

На практике при изучении ЭМП в дальней зоне антенны ограничиваются рассмотрением только ДН по электрической составляющей ЭМП — $E(\theta, \varphi)$, так как величины E и H связаны между собой волновым сопротивлением свободного пространства: $W_0 = 377 \text{ Ом}$, $H = E/W_0$.

ДН по плотности мощности — это зависимость плотности потока мощности ЭМП, излучаемого антенной, от угловых координат в пространстве.

Ненормированная ДН по мощности обозначается следующим образом:

$$\Pi = \Pi(\theta, \varphi) = F^2(\theta, \varphi) \quad \text{при } r = \text{const}. \quad (1.19)$$

Плотность потока мощности — это поток электромагнитной энергии в единицу времени (1 с) через площадку в 1 м. Ему соответствует физический смысл модуля вектора Умова — Пойнтинга:

$$\Pi = |\vec{P}| = \frac{1}{2} \cdot E \cdot H = \frac{1}{2} \cdot \frac{E^2}{W_0} = \frac{E^2}{240\pi}. \quad (1.20)$$

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru