

专题二：天线的电参数 Antenna Parameters

1.2 发射天线的电参数

1.3 互易定理

电参数（电指标）：描述天线工作特性的参数；
——定量衡量天线性能



专题二：天线的电参数

- 一、方向函数
- 二、方向图及其参数
- 三、方向系数
- 四、辐射功率和辐射电阻
- 五、天线效率和增益系数
- 六、天线的极化
- 七、有效长度
- 八、输入阻抗
- 九、频带宽度
- 十、互易定理与接收天线的参数



专题二：天线的电参数

一、方向函数（方向图函数）

定义： 辐射场表达式中与方向有关的因子 $f(\theta, \varphi)$

归一化方向函数：
$$F(\theta, \varphi) = \frac{f(\theta, \varphi)}{f_{\max}(\theta, \varphi)} = \frac{|E(\theta, \varphi)|}{|E_{\max}|}$$

例：电基本振子的辐射电场：
$$E_{\theta} = j \frac{60\pi I l}{\lambda r} \sin \theta e^{-jkr}$$

则：
$$F(\theta, \varphi) = F(\theta) = |\sin \theta|$$



专题二：天线的电参数

二、方向图 (radiation pattern)

1. 定义： 辐射场振幅与方向的关系曲线（将方向函数用曲线描绘出来）
即与天线等距离 r 处，天线辐射场大小在空间中的相对分布随方向变化的图形。

{ 方向图
归一化方向图

{ 极坐标方向图
直角坐标方向图

◆ 立体方向图

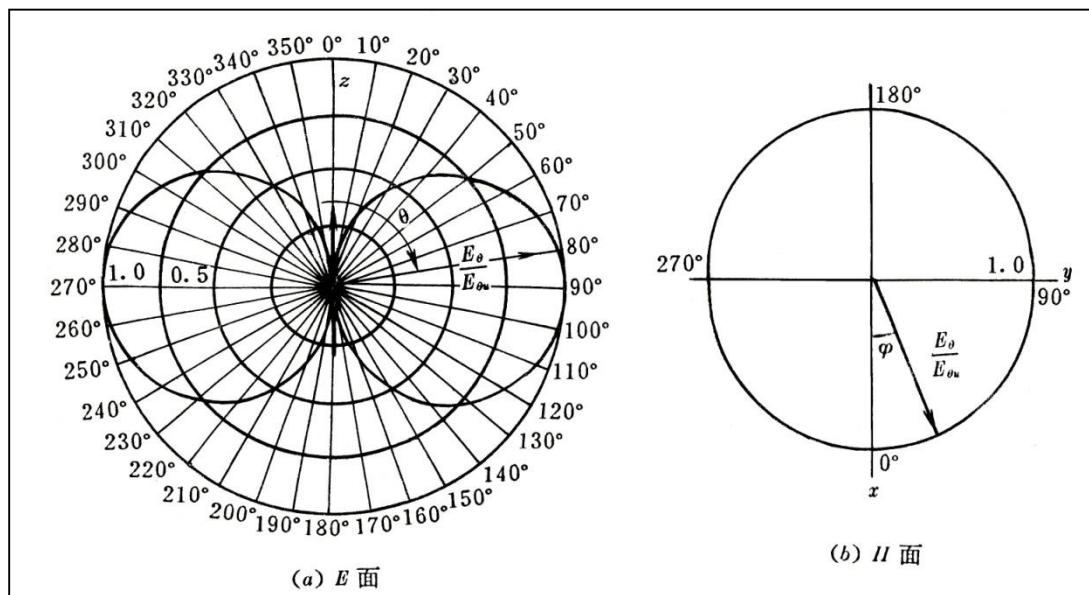
{ E面方向图 E面：电场强度矢量所在并包含最大辐射方向的平面；
H面方向图 H面：磁场强度矢量所在并包含最大辐射方向的平面；



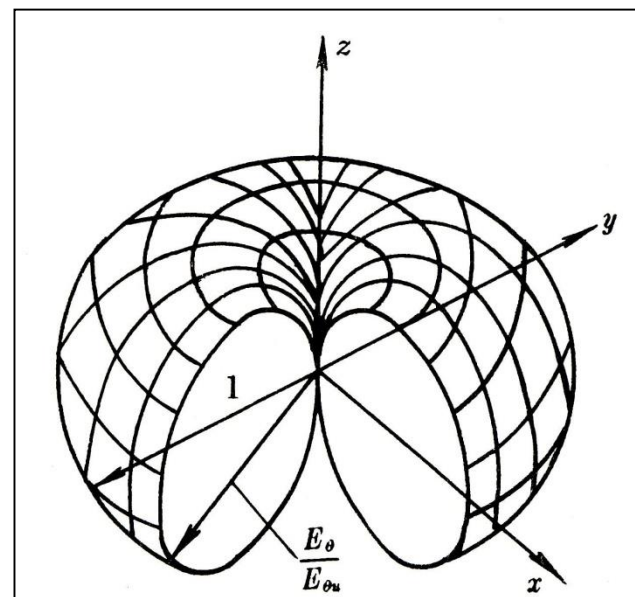
专题二：天线的电参数

例：电基本振子：

$$F(\theta, \varphi) = F(\theta) = |\sin \theta|$$

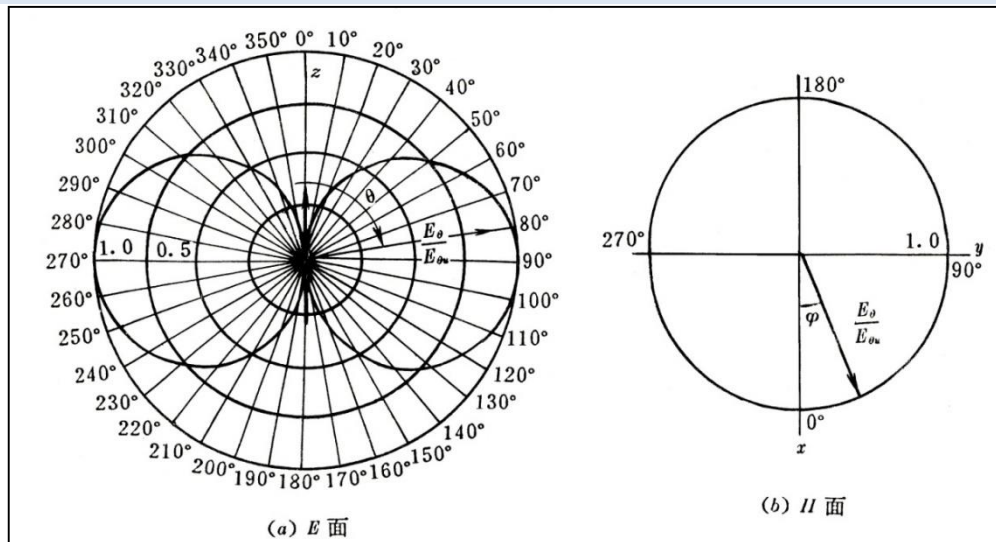


电基本振子的E、H面方向图

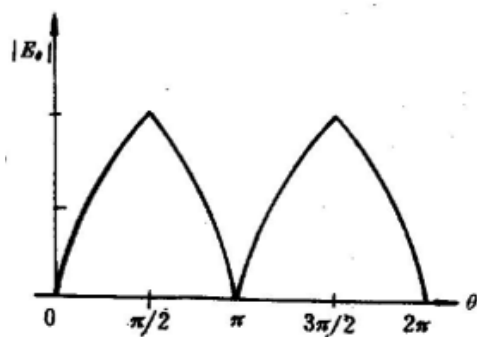


电基本振子的立体方向图

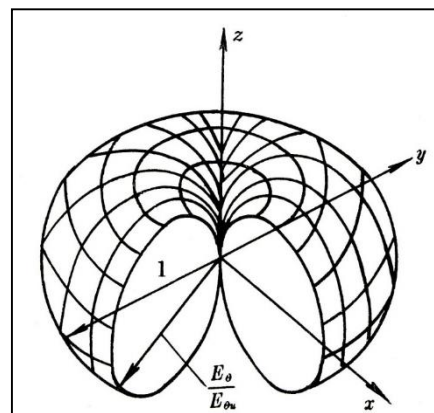
专题二：天线的电参数



电基本振子的E、H面方向图



E面直角坐标方向图



立体方向图

专题二：天线的电参数

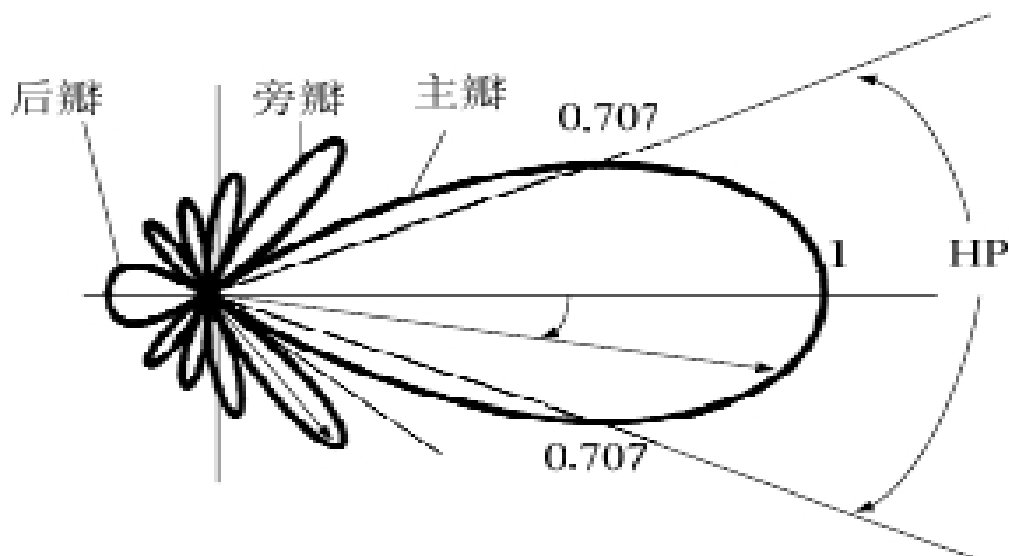
2. 半功率波瓣宽度 (Half Power Beamwidth)

$$\text{HP} \quad 2\theta_{0.5E} \quad 2\theta_{0.5H}$$

定义：方向图最大方向两侧半功率点方向 $\theta_{0.5}$ 之间的夹角。

即，主瓣两侧半功率点处，即 $F(\theta) = 1/\sqrt{2} = \sqrt{2}/2 = 0.707$ 处的 $2\theta_{0.5}$ 角

◆ 一般地说，半功率宽度愈窄，表示天线方向性愈强。



专题二：天线的电参数

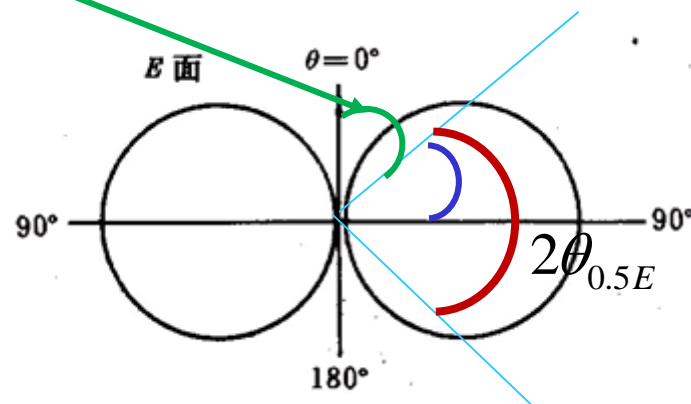
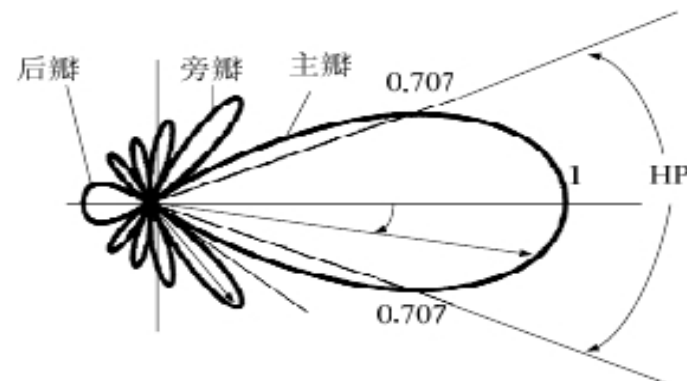
例：电基本振子

$$F(\theta, \varphi) = F(\theta) = |\sin \theta|$$

$$\sin(\theta') = 0.707 \quad \theta' = 45^\circ$$

从最大方向算起 $\theta_{0.5} = (90^\circ - \theta') = 45^\circ$

$$HP = 2\theta_{0.5} = 2(90^\circ - 45^\circ) = 90^\circ$$



专题二：天线的电参数

3. 零功率点波瓣宽度

主瓣最大值两边两个零辐射方向之间的夹角；

4. 旁瓣电平 (副瓣电平) SLL (Side-Lobe Level)

旁瓣的最大值与主瓣最大值之比，用分贝表示

$$SLL = 10 \lg \frac{S_{av, \max 2}}{S_{av, \max}} = 20 \lg \frac{E_{\max 2}}{E_{\max}} \text{ dB}$$

- 一般希望旁瓣电平低些，通常要求低于-20dB。

5. 前后比：

主瓣最大值与后瓣最大值之比，用分贝表示；

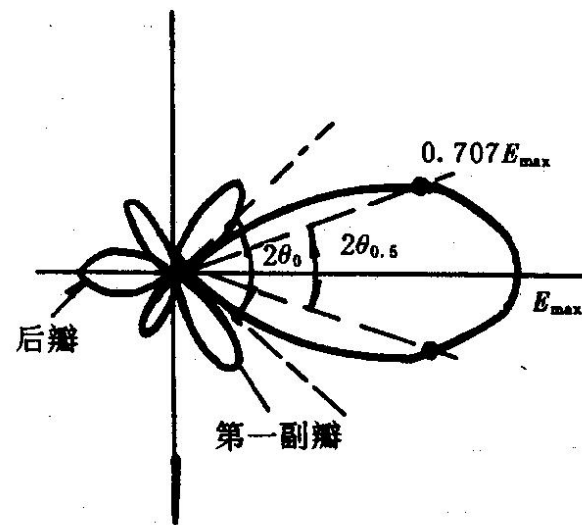


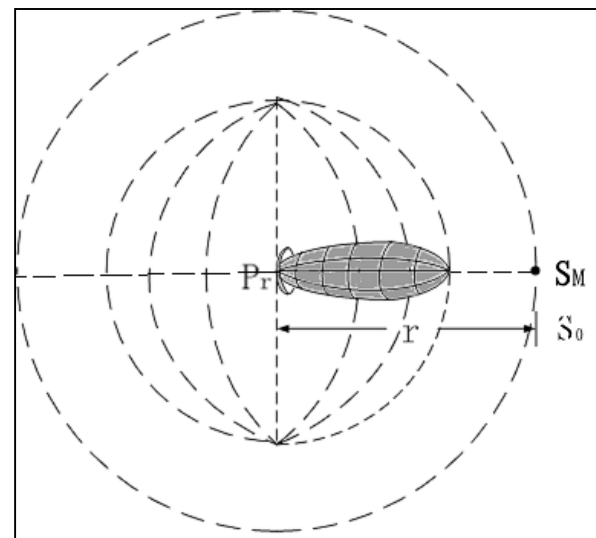
图 1-3-2 主瓣宽度与旁瓣电平

专题二：天线的电参数

三、方向性系数D

1. 定义

在同一距离及相同**辐射功率**的条件下，某天线在最大辐射方向上的辐射功率密度与无方向性天线（点源）的辐射功率密度之比；



方向性系数的定义

$$D = \frac{S_M}{S_0} \Big|_{P_r \text{ 相同}, r \text{ 相同}}$$

- 能够比较出不同天线最大辐射的相对大小（方向性的强弱）；

专题二：天线的电参数

$$D = \frac{S_M}{S_0} \Big|_{P_r \text{ 相同}, r \text{ 相同}}$$

$$S_M = \frac{1}{2} \frac{|E_{\max}|^2}{\eta_0} = \frac{1}{2} \frac{|E_{\max}|^2}{120\pi}$$

$$S_0 = \frac{P_r}{4\pi r^2}$$

故

$$D = \frac{\frac{1}{2} \frac{|E_{\max}|^2}{120\pi}}{\frac{P_r}{4\pi r^2}} = \frac{|E_{\max}|^2 r^2}{60P_r}$$

因此

$$|E_{\max}| = \frac{\sqrt{60P_r D}}{r}$$



专题二：天线的电参数

2. 物理意义

$$|E_{\max}| = \frac{\sqrt{60P_r D}}{r}$$

(1) 在辐射功率相同的情况下，有方向性天线在最大方向的场强是无方向性天线的场强的 \sqrt{D} 倍。

- 相当于对最大辐射方向辐射功率增大到 D 倍，把 $P_r D$ 称为天线在该方向的等效辐射功率。
- 物理实质：天线在其它方向辐射的部分功率加到此方向了，并且主瓣愈窄，加强得愈多，则方向性系数愈大。

(2) 如果要在场点产生相同场强($E_M = E_0$), 有方向性天线辐射功率是无方向性天线的 $1/D$ 倍。

以上讨论可知：方向性系数由场强在空间的分布情况决定，若方向图给出了，则 D 确定。



专题二：天线的电参数

3. 计算公式

由方向图函数知： $|E(\theta, \varphi)| = E_M F(\theta, \varphi)$ ，故而

$$P_r = \oint_s \frac{1}{2} \frac{|E(\theta, \varphi)|^2}{120\pi} ds = \frac{E_M^2}{240\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F^2(\theta, \varphi) r^2 \sin \theta d\theta d\varphi$$

代入，得

$$D = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F^2(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}$$

若 $F(\theta, \varphi) = F(\theta)$ 则

$$D = \frac{2}{\int_0^\pi F^2(\theta) \sin \theta d\theta}$$

- 对于主瓣愈窄，上式的分母积分愈小， D 愈大。
- 对于旁瓣可以忽略（副瓣电平在-20dB以下）的天线，可用二主面半功率宽度来估算方向性系数：

$$D = \frac{41000}{(2\theta_{0.5E}) \cdot (2\theta_{0.5H})}$$

例P.11： 1-2-1



四、辐射功率 P_r 和辐射电阻 R_r

1. 辐射功率（以电基本振子为例）

电基本振子所辐射的平均功率密度

$$\bar{S}^{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}}^*] = \hat{r} \frac{1}{2} \frac{|E_\theta|^2}{\eta_0} = \hat{r} \frac{\eta_0}{2} \left(\frac{Il}{2\lambda r} \sin \theta \right)^2$$

因此，辐射功率（平均功率密度在包围电流元的球面上的面积分）：

$$\begin{aligned} P_r &= \oint_S \bar{S}^{av} \cdot d\mathbf{s} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{\eta_0}{2} \left(\frac{Il}{2\lambda r} \sin \theta \right)^2 r^2 \sin \theta d\theta d\varphi \\ &= \frac{\eta_0}{2} \left(\frac{Il}{2\lambda} \right)^2 2\pi \int_0^\pi \sin^3 \theta d\theta = \frac{\eta_0}{2} \left(\frac{Il}{2\lambda} \right)^2 2\pi \int_0^\pi (1 - \cos^2 \theta) d\cos \theta \\ &= \frac{\eta_0}{2} \left(\frac{Il}{2\lambda} \right)^2 2\pi \frac{4}{3} = 40\pi^2 \left(\frac{Il}{\lambda} \right)^2 \end{aligned}$$

专题二：天线的电参数

2. 辐射电阻

设想辐射功率是由一电阻吸收的，把这个电阻称为辐射电阻。

那么辐射功率和辐射电阻的关系：
$$P_r = \frac{1}{2} I^2 R_r$$

电基本振子：
$$R_r = 80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2$$

- 已知任一天线的辐射电阻 \Rightarrow 天线的辐射功率



专题二：天线的电参数

五、天线效率 η_A 和 增益系数 (Gain) G

实际中，由于天线的导体和介质的欧姆损耗，使它的辐射功率 P_r 小于其输入功率 P_{in} 。

若天线的损耗功率 $P_l = \frac{1}{2} I^2 R_l$

则天线的**辐射效率**为

$$\eta_A = \frac{P_r}{P_{in}} = \frac{P_r}{P_r + P_l} = \frac{R_r}{R_r + R_l} = \frac{1}{1 + \frac{R_l}{R_r}}$$

- 对于大多数微波天线欧姆损耗很小， $\eta_A \approx 1$ 。



专题二：天线的电参数

天线增益系数：

天线在最大辐射方向上远区场点的功率密度与输入功率相同的无方向性天线在同一点的功率密度之比：

$$G = \frac{S_{\max}}{S_0} \bigg|_{P_{in} \text{ 相同}, r \text{ 相同}} = \frac{\frac{1}{2} \frac{|E_{\max}|^2}{120\pi}}{\frac{P_r}{4\pi r^2}} = \frac{|E_{\max}|^2 r^2}{60 P_{in}} = \frac{|E_{\max}|^2 r^2}{60 P_r} \frac{P_r}{P_{in}} = D \eta_A$$

- 通常用分贝来表示增益： $G(\text{dB}) = 10 \lg G$ ， dB
- 对于微波天线，由于辐射效率很高，天线增益与方向性系数差别较小，这两个术语往往是混用。



六.天线的极化

1. 定义： 天线在给定方向所辐射电磁波的极化。
若未指明，一般指最大场强方向上的极化；

2. 天线不能接收与其正交的极化分量

- 线极化天线不能接收来波中与其极化方向垂直的线极化波；
- 圆（椭圆）极化天线不能接收来波中与其正旋向相反的交的圆（椭圆）极化分量；

3. 极化失配意味着功率损失，一般用极化失配因子来量化衡量；

七.有效长度

定义： 在保持实际天线最大辐射方向上的场强值不变的条件下，假设天线上电流分布均匀时天线的等效长度。

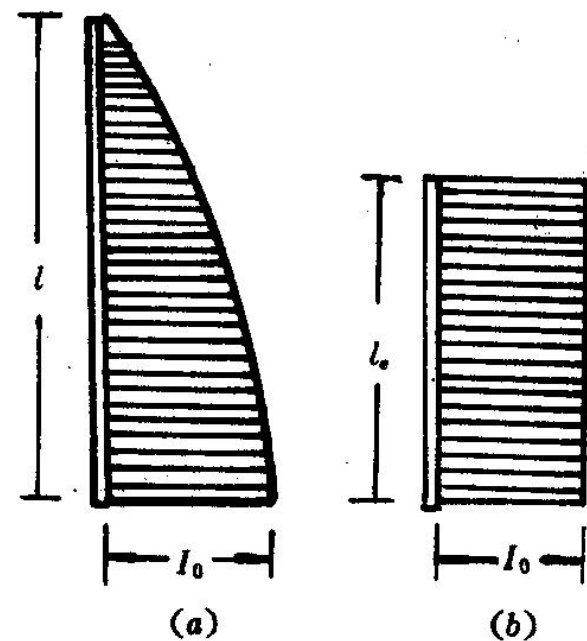


图 1 - 3 - 3 求天线有效长度 l_e

➤ 在天线设计中，可采取措施以加大天线的有效长度，用来提高天线的辐射能力。

专题二：天线的电参数

八. 天线的输入阻抗

定义： 天线输入端呈现的阻抗值；

即，馈线的负载阻抗，决定馈线的驻波状态。

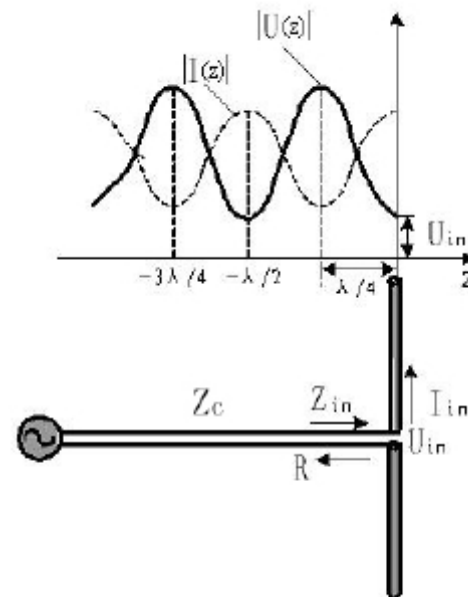
$$Z_{in} = \frac{U_{in}}{I_{in}} = R_{in} + jX_{in}$$

通常用电压驻波比 S (ρ) 来表示馈线的驻波状态:

$$S = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}$$

也用反射损耗 L_R (*Return Loss*) : $L_R = 20 \lg |\Gamma|$, dB 天线馈线上的行驻波

匹配状态： $S=1$, $L_R=0\text{dB}$ 全部入射功率都传输给了天线;无反射波回振荡源,
不致影响振荡源的输出频率和输出功率。



专题二：天线的电参数

九.天线的频带带宽 bandwidth

定义： 天线电参数在容许范围之内的频率范围；

◆ **绝对带宽：** $B=f_h-f_l$ f_h —带宽内最高 (*highest*) 频率；

f_l —带宽内最低 (*lowest*) 频率；

◆ **相对带宽或称百分带宽：** $B_r=(f_h-f_l)/f_0 \times 100\%$, f_0 —中心频率或设计频率；

◆ **比带宽：** 对宽频带天线，往往直接用比值 f_h/f_l 来表示其带宽。

将相对带宽 B_r 小于10%的天线称为**窄带**天线；

将 f_h/f_l 大于2 : 1的天线称为**宽带**天线；

若 f_h/f_l 大于3 : 1可称为**特宽带**天线 (ultra-wide band 即UWB) ；

对 f_h/f_l 在10 : 1以上的天线，通常称为**超宽带** (super-wideband即SWB) 天线。



十. 互易定理与接收天线的参数

1. 电磁场理论中的互易定理可以证明收发互易性

接收天线的工作过程是发射天线的逆过程；

天线的收发互易性：同一天线收发参数相同的性质



专题二：天线的电参数

2. 有效（接收）面积 A_e

天线用作接收时，能从来波中获取的最大功率 $P_{L\max}$ 与来波的实际功率流密度 S_{av} 成正比；

$$P_{L\max} = A_e S_{av} \quad \Rightarrow \quad A_e = \frac{P_{L\max}}{S_{av}}$$

- 比例系数 A_e 由于具有面积的量纲，因而称为有效(接收)面积(effective area)。
- 接收天线在最佳状态下所接收到的功率可看做是被具有面积为有效面积的口面所截获的垂直入射波功率密度的总和。
- 有效接收面积是衡量天线接收无线电波能力的重要指标。



专题二：天线的电参数

当 $Z_L = Z_{in}^*$ (共轭匹配) 时, 负载获得最大接收功率:

推导可得增益 G 与有效面积 A_e 的关系:

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G$$



专题二：天线的电参数

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G$$

令 $A_e = A \cdot \eta_A$ ， A 为天线在与其最大方向相垂直的截面上的几何面积， η_A 为天线效率，

则，

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A_e = 4\pi \frac{A}{\lambda^2} \cdot \eta_A$$

- 在效率 η_A 不变的情况下，天线的电面积 A/λ^2 愈大，则天线的增益愈高。



专题二：天线的电参数

作业：

P.47: 1、6、8、12、14

