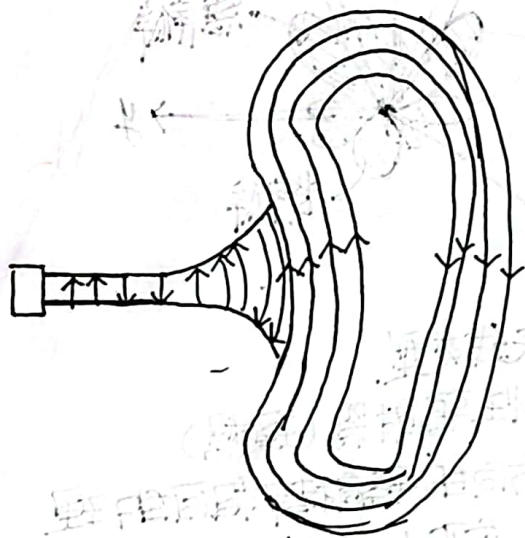


# Lecture Chapter II 天线的类型和参数

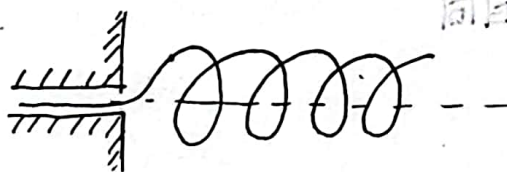
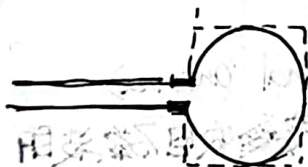
## 一、天线——传输信号



Source 传输线 天线 | 辐射的自由空间波

### • 线天线的形状

偶极子天线  
Dipole



## 二、天线的基本参数: 功率在空间中的分配

### 1. 天线的方向图 (Antenna radiation pattern)

人们最关心的辐射特性是在半径一定的球面上, 随着观察者的变化, 辐射能量在三维空间的分布。

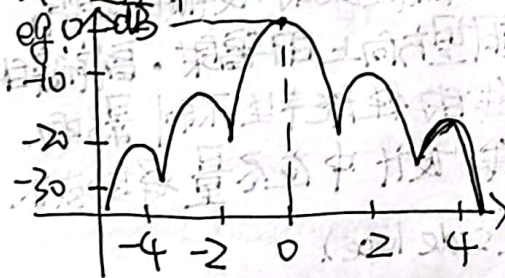
• **场型 (field pattern):** 指天线在空间中的电场强度或磁场强度分布图案

• **功率型 (Power patterns):** 指天线在不同方向上的功率辐射密度分布图案。

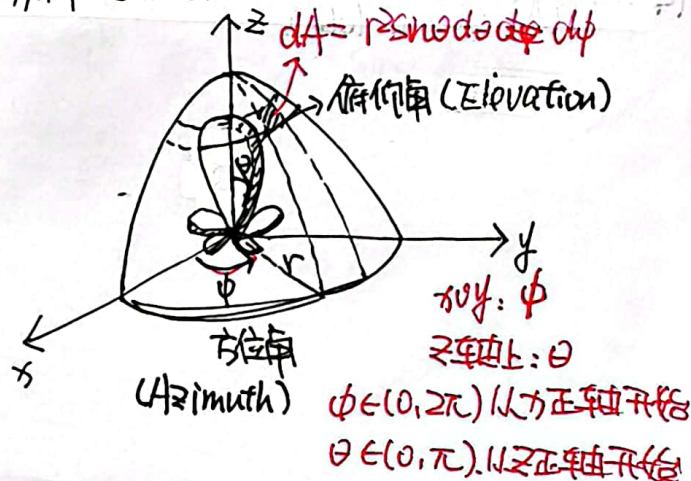
• **标准化型 (Normalized patterns):** 指将场型或功率型进行归一化处理后得到的图案。

归一化方法:  $10 \lg \frac{E}{E_m}$  或  $10 \lg \frac{P}{P_m}$

这样处理后, 不同的天线的方向图就可以放在同一个坐标系中进行比较, 从而更好地评估其差异性。



### • 分析天线坐标





## 2. 波束宽度 (Beamwidth)

### • 半功率波束宽度 (Half-Power Beamwidth) HPBW:

从辐射强度最大值方向开始, 辐射强度下降到最大值一半时, 所对应的两个方向之间的夹角。



HPBW 为角度。

## 3. 天线图案的不同部分

### (1) 主瓣 (major lobe)

包含最大辐射方向的波瓣

### (2) 副瓣 (minor lobe)

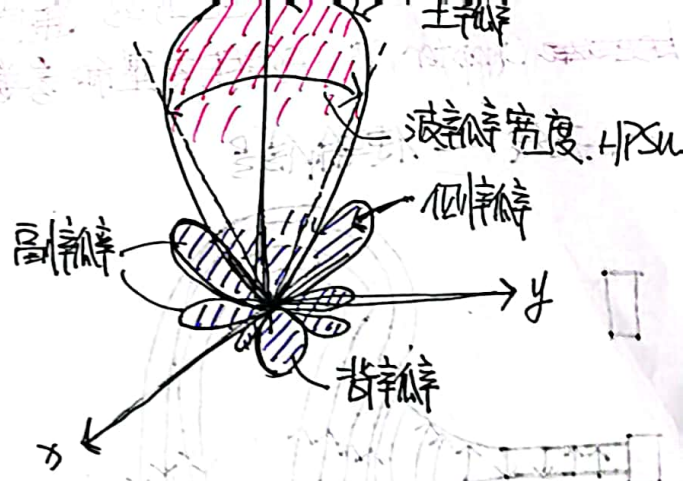
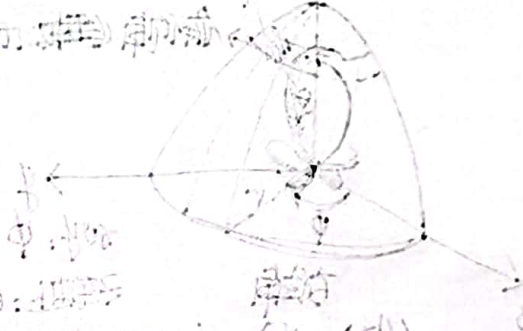
方向在主瓣之外的波瓣, 通常代表着在不期望方向上的辐射。副瓣的大小会对天线的性能产生不利影响, 因此在天线设计中应尽量将其减小。

### (3) 侧瓣 (side lobe)

是副瓣中方向最大的一个

### (4) 背瓣 (back lobe)

(non-desired) 副瓣



## 4. 三种天线类型

### (1) 各向同性辐射器 (理想)

"所有方向的辐射都相同的理想天线". 实际上不存在



### (2) 全向性天线 (Omnidirectional)

水平方向是无方向性的, 但垂直方向有方向性。

### (3) 定向天线 (Directional Antenna)

在不同方向辐射或接收电磁波的能力各不相同

存在

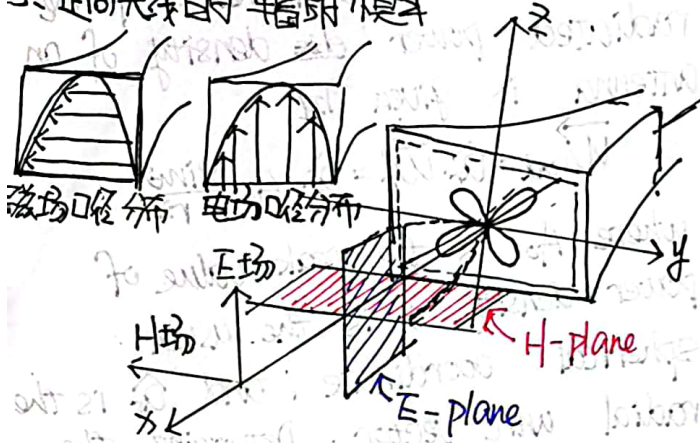


扫描全能王 创建



## Chapter II 天线的类型和参数

1. 定向天线的辐射模式



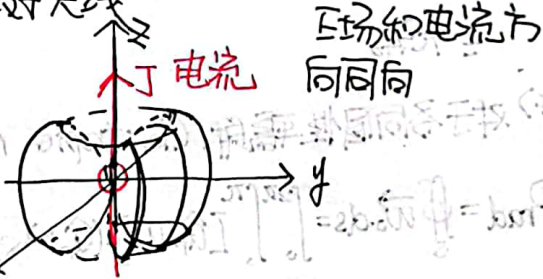
在实际中, 通常用E面和H面的方向图来描述天线性能

E面: 包含电场矢量方向

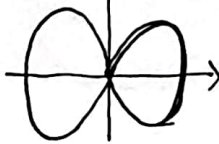
H面: 包含磁场矢量方向

E面和H面是空间的概念, 不是E场和H场, 但是E面和H面包含E场和H场。

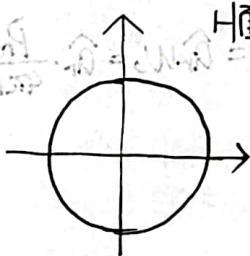
• 偶极子天线



功率模式 - E面



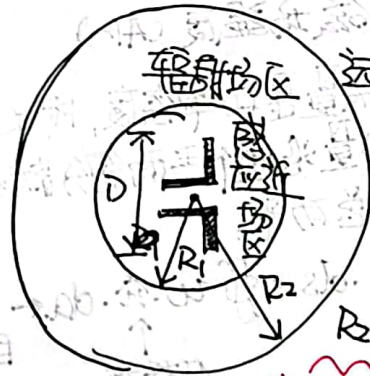
H面



b. 场的分区

通常把天线周围的空间细分为三个区域

- 感应近场区 (Reactive near-field region)
- 辐射近场区
- 远场区



$R = \frac{2D^2}{\lambda}$  波长, D 天线的最大尺寸

• 远场区:

在该区域中, 辐射场的角分布与距离无关。~~在远场区~~

在离天线足够远时, 电磁波辐射场呈现出近似平面波的性质 (相当于波的传播), E和H同向

下复习概念

(1) 弧度 (radian): 一个整圆弧度为  $2\pi$

(2) 立体弧度 (steradian): 一个整球为  $4\pi$  的立体弧度

(3) 面积元  $dA = r^2 \sin\theta d\theta d\phi$

(4) 立体角:  $d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \sin\theta d\theta d\phi$





描述功率与电磁波的关系, 偶用的量是 瞬时坡印序矢量

$$w = \varepsilon \times \mathcal{H}$$

表示波能量瞬间  
的传播方向上的能

$\varepsilon$ : 瞬时电场强度 (V/m)

比: 瞬时磁场强度 (A/m)

(2). 由于坡印亭矢量是功率密度, 所以坡印亭矢量的法线分量沿整个表面积分就得到.

闭胎表面的总功率:

•  $P = \oint w \cdot ds = \oint w \cdot \hat{n} \cdot da \leftarrow$  閉合表面  
 的面積元  
 ↑ 任意方向  
 ↑ 瞬时总功率

(3) 对于附谐波:

$$E(x, y, z, t) = \text{Re}[\vec{E}(x, y, z) e^{j\omega t}]$$

$$U(x, y, z; t) = \operatorname{Re} [\bar{U}(x, y, z) e^{j\omega t}]$$

由于  $\Re[\tilde{E}e^{j\omega t}] = \frac{1}{2}[\tilde{E}e^{j\omega t} + \tilde{E}^*e^{-j\omega t}]$

故  $w = E x H = \frac{1}{2} \text{Re}[\tilde{E} x \tilde{H}^*] + \frac{1}{2} \text{Re}[\tilde{E} x \tilde{H} e^{j2\omega t}]$

• 鼓印序天目

对于时变场,通常更希望求出平均功率密度.

• 坡印亭矢量的时间平均值 (平均功率密度)

$W_{av}(y, z) = \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}^*]$  ↙ 时谐场平均功率项着除

- 整个天线的辐射功率

$$P_{\text{rad}} = \oint_S W_{\text{rad}} \cdot d\mathbf{s} = \frac{1}{2} \oint_S \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*) \cdot d\mathbf{s}$$

$$\vec{W}_{\text{rad}} = \hat{a}_r \cdot \vec{W}_r = \hat{a}_r \cdot A_0 \cdot \frac{\sin \theta}{r^2}$$

where  $A_0$  is the peak value of power density,  $\vartheta$  is the usual spherical coordinate, and  $\hat{a}_r$  is the radial unit vector. Determine the total radiated power.

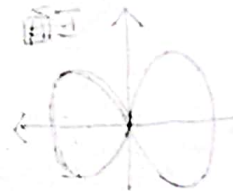
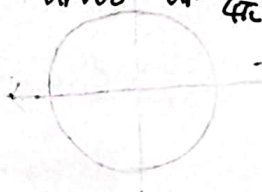
解: 找一个半径为  $r$  的封闭球面, 要求  
总辐射功率

$$\begin{aligned}
 P_{\text{rad}} &= \oint_S \vec{u}_{\text{rad}} \cdot \hat{n} \, da \\
 &= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (\hat{a}_r A_0 \frac{\sin\theta}{r^2}) (\hat{a}_r r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi) \\
 &= A_0 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin^2\theta \, d\theta \, d\phi \\
 &= \pi^2 A_0
 \end{aligned}$$

(4) 对于各向同性辐射 (isotropic radiator)

$$P_{\text{rad}} = \oint_S \vec{w}_0 \cdot d\vec{s} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi [\hat{a}_r \cdot \vec{w}_0] \cdot (\hat{a}_r r^2 \sin\theta d\theta d\phi) \\ = 4\pi r^2 w_0$$

$$\vec{W}_0 = \hat{a}_r W_0 = \hat{a}_r \cdot \frac{P_{rad}}{4\pi r^2}$$





## Chapter II

1. 辐射强度 (radiation intensity)

(1) 给定方向上辐射强度的定义为:

"天线在单位立体角内所辐射的功率"

$$U = r^2 \cdot W_{rad}$$

$U$ : 辐射强度 ( $W$ /单位立体角)

$W_{rad}$ : 辐射密度 ( $W/m^2$ )

任意一个方向上的辐射强度

(2) 辐射强度与天线远场区之间关系为:

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2\eta} |E(r, \theta, \phi)|^2 \approx \frac{r^2}{2\eta} [ |E_\theta(r, \theta, \phi)|^2 + |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2 ]$$

$\vec{E} = E_\theta \hat{e}_\theta + E_\phi \hat{e}_\phi$   
 $E_r$  在远场中为 0, 因为远场中传播方向与  $\vec{E}$  垂直.

(3) 总辐射功率

• 立体角:  $\Omega$



平面角: "平面角是单位圆上的一段弧长"  $r=1, \theta=2$ .



单位球面中, 任意物体投影到球面的投影面积, 即为该物体相对观测点 (球心) 的立体角.

"立体角是单位球面上的一块面积"

• 立体角公式:

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \sin\theta d\theta d\phi$$

• 沿整个  $4\pi$  立体角积分便得到总辐射功率

$$P_{rad} = \oint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin\theta d\theta d\phi$$

[3.1] The radial component of the radiated power density of an antenna.

[3.1] 利用  $P_{rad}$  求上一个例题中的总辐射功率

$$W_{rad} = \hat{a}_r W_r = \hat{a}_r A_0 \frac{\sin\theta}{r^2}$$

解:

$$U = r^2 \cdot W_{rad} = A_0 \sin\theta$$

$$P_{rad} = \oint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin\theta d\theta d\phi = \pi^2 A_0$$

10. 方向性系数 (Directivity)

天线在给定方向上的辐射强度与在所有方向上的平均辐射强度之比.

(1)

辐射强度平均值  $U_0 = \frac{P_{rad}}{4\pi}$  ( $W$ /单位立体角)

某个方向上  $D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}}$

(2) 最大方向性系数为:

$$D_{max} = D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}}$$





[B1] Find the maximum

(3). 部分方向性 (partial directivity)

总方向性可分解为  $\theta$  和  $\phi$  正交的分量.

$$D_0 = D_\theta + D_\phi$$

其中

$$D_\theta = \frac{4\pi U_\theta}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi}$$

$$D_\phi = \frac{4\pi U_\phi}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi}$$

[B1]: Find the maximum directivity of the antenna whose radiation intensity is that of previous. Write an expression for the directivity as a function of the directional angles  $\theta$  and  $\phi$ .

$$W_{rad} = \hat{a}_r \cdot W_r = \hat{a}_r \cdot A_0 \cdot \frac{\sin^2 \theta}{r^2}$$

解:

$$U = r^2 W_{rad} = A_0 \sin^2 \theta$$

当  $\theta = \frac{\pi}{2}$  时,  $U$  取得最大值

$$U_{max} = A_0$$

由  $P_{rad} = \pi^2 A_0$ , 最大方向性,

$$D_0 = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} = \frac{4\pi A_0}{\pi^2 A_0} = \frac{4}{\pi} = 1.27$$

由于辐射强度只是  $\theta$  的函数, 故:

$$D = D_0 \sin^2 \theta = 1.27 \sin^2 \theta$$

11. 天线效率 (Antenna efficiency)

由于阻抗匹配等原因, 天线只能发射一部分能量. 天线效率指的是天线发射出去的功率占输入功率的百分比.

• 损耗主要由以下引起:

① 天线与传输线失配

② I/R 损耗

• 天线的总效率:

$$\epsilon_0 = \epsilon_r \epsilon_{cd} = \epsilon_r \cdot \epsilon_{cd}$$

$\epsilon_r$ : 反射效率 (reflection efficiency)

$$= 1 - |\Gamma|^2$$

$\epsilon_{cd}$ : 导电效率 (conduction efficiency)

$\epsilon_d$ : 介质效率 (dielectric efficiency)

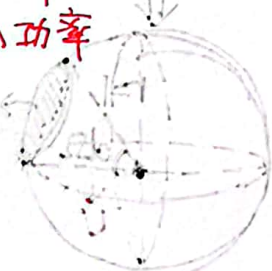
$\Gamma$ : 天线输入端的反射系数

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad \begin{array}{l} Z_{in}: \text{天线的输入阻抗} \\ Z_0: \text{传输线的特征阻抗} \end{array}$$

$$\epsilon_0 = \epsilon_r \cdot \epsilon_{cd} = \epsilon_{cd} (1 - |\Gamma|^2)$$

$$\epsilon_{cd} = \epsilon_c \cdot \epsilon_d = \text{天线的辐射效率}$$

$$\epsilon_{cd} = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \leftarrow \begin{array}{l} \text{辐射功率} \\ \text{输入功率} \end{array}$$





## Chapter II.

### 12. 天线增益 (Gain).

~~输入功率与功率密度、天线增益、功率密度~~  
~~功率密度与参考天线增益~~

$$Gain = G = 4\pi \frac{U}{P_{in}}$$

$$\cancel{P_{rad}} = E_{cd} P_{in}$$

$$\cancel{G = 4\pi E_{cd} \frac{U}{P_{rad}} = 4\pi E_{cd} \cdot D}$$

$$G_0 = E_{cd} D_0$$

- 大多数情况下, 我们研究相对增益:  
"指定方向的功率增益与参考天线在参考方向的功率增益之比".

- 增益的另一种计算式:

$$\text{由 } P_{rad} = E_{cd} P_{in} \Rightarrow P_{in} = \frac{P_{rad}}{E_{cd}}$$

$$G(\theta, \phi) = E_{cd} D(\theta, \phi)$$

$$G_0 = G(\theta, \phi)|_{\max} = E_{cd} D(\theta, \phi)|_{\max} = E_{cd} D_0$$

$$G_0(\text{dB}) = 10 \lg(E_{cd} D_0) \quad \leftarrow \text{线性转对数.}$$

$$= 10 \lg(E_{cd}) + 10 \lg(D_0)$$

- Realized gain:

若考虑到反射/匹配损耗, 则增益进一步表示为:

$$G_{re} = e_0 D(\theta, \phi) \quad \leftarrow \text{修正}$$

$$G_{re0} = e_0 D_0$$

[31]:

A lossless resonant half-wavelength dipole antenna, with input impedance of  $73\Omega$ , is connected to transmission line whose characteristic impedance is  $50\Omega$ . Assuming that the pattern of the antenna is given approximately by:

$$U = B_0 \sin^3 \theta$$

find the maximum realized gain of this antenna.

解:

$$U_{\max} = B_0 \sin^3 \theta = B_0$$

$$P_{rad} = \oint U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin \theta d\theta d\phi = B_0 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin^3 \theta d\theta d\phi$$

$$= 2\pi B_0 \int_0^\pi \sin^3 \theta d\theta$$

$$= \frac{3\pi^2 B_0}{4}$$

$$D_0 = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} = \frac{16}{3\pi} = 1.697$$

由于天线是无损耗的, 故辐射效率  $E_{cd} = 1$ .

$$G_0 = E_{cd} D_0 = 1.697$$

$$G_0(\text{dB}) = 10 \lg(1.697) = 2.297$$

对于 realized gain, 匹配效率

$$e_r = 1 - |\Gamma|^2 = \left(1 - \left|\frac{73-50}{73+50}\right|^2\right) = 0.965$$

$$e_r(\text{dB}) = 10 \lg(0.965) = -0.155$$

$$e_0 = e_r E_{cd} = 0.965$$

$$e_0(\text{dB}) = -0.155$$

$$G_{re0} = e_0 D_0 = 1.6376$$

$$G_{re0}(\text{dB}) = 10 \lg(1.6376) = 2.14$$



### 13. 带宽 (Bandwidth).

#### (1) 窄带带宽 (narrowband antennas).

带宽可以用中心频率的百分比表示  
频率差 (上频 - 下频)

[例] 中心频率  $f_c = 2400 \text{ MHz}$ , 带有 5% 的带宽

$$f_B = 5\% \cdot f_c = 120 \text{ MHz}$$

↑  
可容许的工作频率差

#### (2) 宽带带宽 (broadband antennas).

通常用可容许工作的上、下限频率之比作带宽

[例] 10:1 的带宽表示上限工作频率高于下限工作频率 10 倍

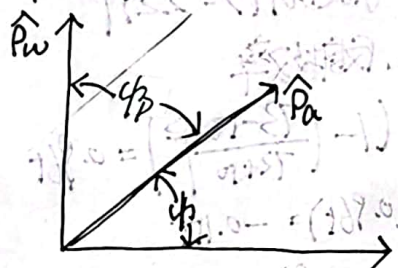
### 14. 极化 (Polarization).

#### (1) "天线受到辐射对其辐射波的极化"

与平面波类似, 极化可分为线极化, 圆极化和椭圆极化.

#### (2) 极化损耗因子 (PLF)

(polarization loss factor)



接收天线的极化与入射波的极化一般不相同, 通常叫"极化失配" (polarization mismatch).

也就是说入射角和接受角存在角度一定的角度.

入射波的单位矢量  $\hat{p}_w$

接收天线的单位矢量  $\hat{p}_a$

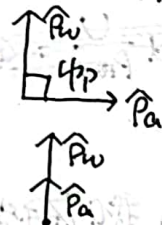
~~极化损耗~~

两个单位矢量之间夹角  $\phi_p$

极化损耗因子 (PLF):

$$PLF = |\hat{p}_a \cdot \hat{p}_w|^2 = |\cos \phi_p|^2$$

$$\begin{cases} \cos \phi_p = 0 \\ \cos \phi_p = 1 \end{cases}$$



[补充] 这解释了为什么天线都是互相垂直安装.

