

天线 Antennas

第2讲 天线元的辐射

褚庆昕

华南理工大学电子与信息学院
天线与射频技术研究所
qxchu@scut.edu.cn



*Research Institute of Antennas & RF Techniques
School of Electronic & Information Engineering*

第2讲内容

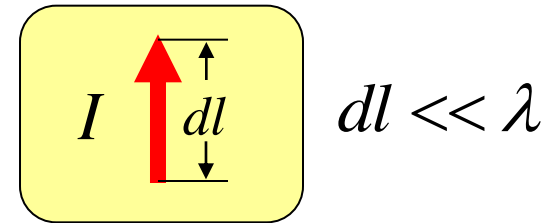
- ❖ 电流元的辐射
- ❖ 磁流元的辐射
- ❖ 天线的辐射特性参数



2.1 电流元辐射

- ❖ **电流元**：电流的一个微分段，即长度远小于波长的一段电流，电流均匀分布。

$$i(t) = I \cos \omega t = \operatorname{Re}[I e^{j\omega t}]$$



- ❖ 电流元是最基本、最简单的天线，也是认识和分析天线最好的样本。
- ❖ 任何天线都可看成由电流元组成，天线的辐射为所有电流元辐射的叠加。



- ❖ 首先根据波动方程求电流元产生的电磁场：

$$(\nabla^2 + k^2)\vec{H} = -\nabla \times \vec{J}$$

$$(\nabla^2 + k^2)\vec{E} = j\omega\mu\vec{J} + \nabla(\rho/\epsilon)$$

- ❖ 但是，上面方程中场强与源的关系复杂，不便于计算。通常采用位函数法。
- ❖ 根据磁矢位 A 和电标位 φ 的定义以及Lorenz规范

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad \vec{E} = -\nabla\varphi - j\omega\vec{A} \quad \nabla \cdot \vec{A} + j\omega\mu\epsilon\varphi = 0$$

可得磁矢位 A 满足的波动方程

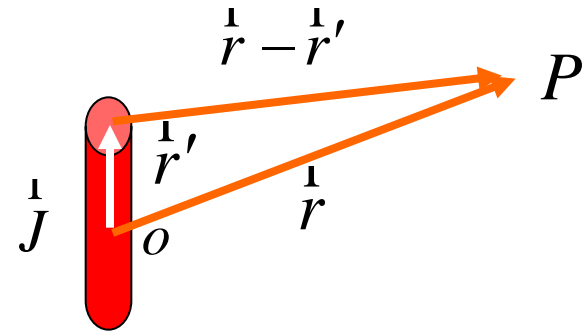
$$(\nabla^2 + k^2)\vec{A} = -\mu\vec{J}$$



- ❖ 可见磁矢位与源的关系简单。因此，利用矢量位求电流元产生的电磁场。在自由空间，磁矢位波动方程的解为

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \int_v \mathbf{J}(\mathbf{r}') \frac{\mu e^{-j\beta R}}{4\pi R} dv$$

$$R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$$



- ❖ 设电流元沿z方向放置，由于很细很短，则矢量位为

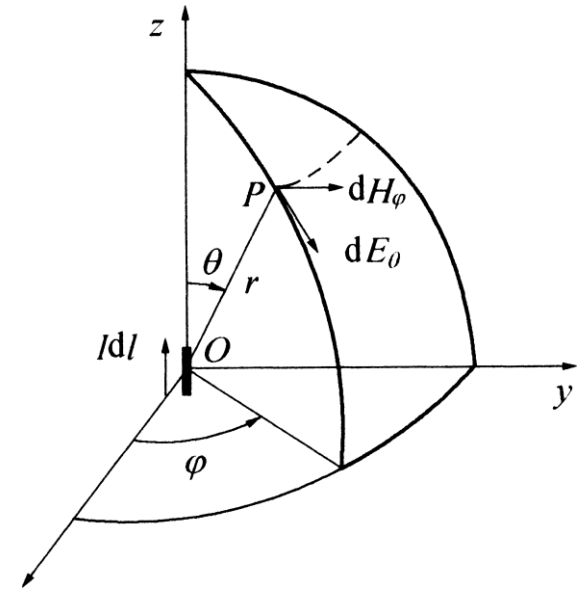
$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \int_v \hat{a}_z J \frac{\mu e^{-j\beta r}}{4\pi r} dl ds = \hat{a}_z \frac{\mu_0 I dl}{4\pi} \frac{e^{-j\beta r}}{r} \quad I = \int_v J ds$$





球坐标下

$$\left. \begin{aligned} A_r &= A_z \cos \theta = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi} \frac{e^{-j\beta r}}{r} \cos \theta \\ A_\theta &= -A_z \sin \theta = -\frac{\mu_0 I dl}{4\pi} \frac{e^{-j\beta r}}{r} \sin \theta \\ A_\phi &= 0 \end{aligned} \right\}$$



由

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A} = \hat{a}_\phi \frac{1}{\mu_0 r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r A_\theta) - \frac{\partial A_r}{\partial \theta} \right]$$

$$\mathbf{E} = \nabla \times \mathbf{H} / j\omega\epsilon$$

可求得电磁场。



$$H_r = 0$$

$$H_\theta = 0$$

$$H_\varphi = j \frac{Idl}{2\lambda r} \sin \theta \left(1 + \frac{1}{j\beta r}\right) e^{-j\beta r}$$

$$E_r = \frac{\eta Idl}{2\pi r^2} \cos \theta \left(1 + \frac{1}{j\beta r}\right) e^{-j\beta r}$$

$$E_\theta = j \frac{\eta Idl}{2\lambda r} \sin \theta \left[1 + \frac{1}{j\beta r} + \left(\frac{1}{j\beta r}\right)^2\right] e^{-j\beta r}$$

$$E_\varphi = 0$$

其中, $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ 为波阻抗





❖ **近场区** $r \ll \lambda, \beta r \ll 1, e^{-j\beta r} \approx 1$

$$E_r \approx -j \frac{Idl}{4\pi r^3} \frac{2}{\omega \epsilon} \cos \theta$$

$$E_\theta \approx -j \frac{Idl}{4\pi r^3} \frac{1}{\omega \epsilon} \sin \theta$$

$$H_\phi \approx \frac{Idl}{4\pi r^2} \sin \theta$$

$$q = \frac{I}{j\omega}$$

- ❖ 由 $q(t) = \int i(t)dt$ ，可得 $q(\omega) = I / j\omega$ 。代入上面的电场公式，可以发现近场与电偶极子的静电场相同。但是，电荷是以角频率 ω 振荡的，所以也称为振荡电偶极子，简称振子。
- ❖ 磁场与恒定电流产生的磁场相同。
- ❖ 电场与磁场相位差 90° 。坡印廷矢量为虚数。
- ❖ **近场区占优势的是类似静态场的感应场。**



❖ 远场区 $r \gg \lambda$

$$E_{\theta} = j \frac{\eta I dl}{2\lambda r} \sin \theta e^{-j\beta r}$$

$$H_{\varphi} = j \frac{I dl}{2\lambda r} \sin \theta e^{-j\beta r}$$

❖ 电场、磁场为沿r方向传播的电磁波。

❖ 电场、磁场和传播方向相互垂直，且

$$E_{\theta} = \eta H_{\varphi}$$

❖ 电场、磁场同相，坡印廷矢量为实数。

❖ 电场、磁场沿 φ 不变化，沿 θ 按 $\sin\theta$ 变化，有方向性。

❖ 远场区占优势的是辐射场，球面波。



2.2 磁流元的辐射

❖ 对偶原理

对称形式的麦克斯韦方程组

$$\nabla \times \overset{\mathbf{r}}{H} = \varepsilon \frac{\partial \overset{\mathbf{r}}{E}}{\partial t} + \overset{\mathbf{r}}{J}_e$$

$$\nabla \times \overset{\mathbf{r}}{E} = -\mu \frac{\partial \overset{\mathbf{r}}{H}}{\partial t} - \overset{\mathbf{r}}{J}_m$$

$$\nabla \cdot \overset{\mathbf{r}}{\mu H} = \rho_m$$

$$\nabla \cdot \overset{\mathbf{r}}{\varepsilon E} = \rho_e$$





电荷、电流产生的场

$$\nabla \times \overset{\mathbf{r}}{H} = \varepsilon \frac{\partial \overset{\mathbf{r}}{E}}{\partial t} + \overset{\mathbf{r}}{J}_e$$

$$\nabla \times \overset{\mathbf{r}}{E} = -\mu \frac{\partial \overset{\mathbf{r}}{H}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \overset{\mathbf{r}}{\mu H} = 0$$

$$\nabla \cdot \overset{\mathbf{r}}{\varepsilon E} = \rho_e$$

磁荷、磁流产生的场

$$\nabla \times \overset{\mathbf{r}}{H} = \varepsilon \frac{\partial \overset{\mathbf{r}}{E}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \overset{\mathbf{r}}{E} = -\mu \frac{\partial \overset{\mathbf{r}}{H}}{\partial t} - \overset{\mathbf{r}}{J}_m$$

$$\nabla \cdot \overset{\mathbf{r}}{\mu H} = \rho_m$$

$$\nabla \cdot \overset{\mathbf{r}}{\varepsilon E} = 0$$

电流、电荷产生的场与磁流、磁荷产生的场的方程形式相同，只要进行变量代换：

$$\overset{\mathbf{r}}{H} \leftrightarrow -\overset{\mathbf{r}}{E}, \overset{\mathbf{r}}{J}_e \leftrightarrow \overset{\mathbf{r}}{J}_m, \varepsilon \leftrightarrow -\mu, \rho_e \leftrightarrow \rho_m, \eta \leftrightarrow 1/\eta$$

两者可以互相得到，称之为电磁场的对偶原理。

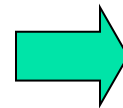


❖ 磁流元的辐射

- 磁流元：长度远小于波长的一段磁流，磁流均匀分布。
- 由对偶原理，磁流元辐射可由电流元辐射场经过对偶变量代换获得：

$$E_{\theta} = j \frac{\eta I dl}{2\lambda r} \sin \theta e^{-j\beta r}$$

$$H_{\phi} = j \frac{I dl}{2\lambda r} \sin \theta e^{-j\beta r}$$



$$E_{\phi} = -j \frac{I_m dl}{2\lambda r} \sin \theta e^{-j\beta r}$$

$$H_{\theta} = j \frac{I_m dl}{\eta 2\lambda r} \sin \theta e^{-j\beta r}$$

电流元辐射场

磁流元辐射场

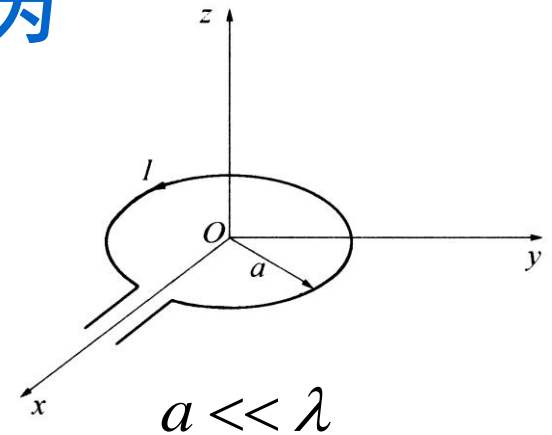


❖ 小电流环的辐射

- 小电流环：半径远小于波长的电流环，电流均匀分布。
- 电磁场计算可知，半径为 a ，电流为 I 的小电流环等效于 $I_m = \frac{j\omega\mu_0 IS}{dl}$ 的磁流元。
- 于是，小电流环的辐射场为

$$E_\varphi = \frac{\eta\pi IS}{r\lambda^2} \sin\theta e^{-j\beta r}$$

$$H_\theta = -\frac{\pi IS}{r\lambda^2} \sin\theta e^{-j\beta r}$$





2.3 天线的辐射特性参数

- ❖ 虽然有了电磁场表达式就可以准确全面地表征天线的辐射特性，但场表达式不方便实际应用。
- ❖ 为此，制定了能够简洁定量表征天线辐射特性的参数，主要包括：
 - 方向图（Pattern，方向性图，波瓣图）
 - 方向系数（Directivity，方向性，定向性）
 - 效率（Efficiency）
 - 增益（Gain）
 - 极化（Polarization）



2.3.1 方向图

❖ **方向图**: 表征辐射场方向性变化的图形。

➤ 归一化电场强度的大小随方向变化的曲线图，称为场强方向图。

$$F_n(\theta, \varphi) = E(\theta, \varphi) / E_{\max}(\theta, \varphi)$$

➤ 归一化辐射功率密度随方向变化的曲线图，称为功率方向图。

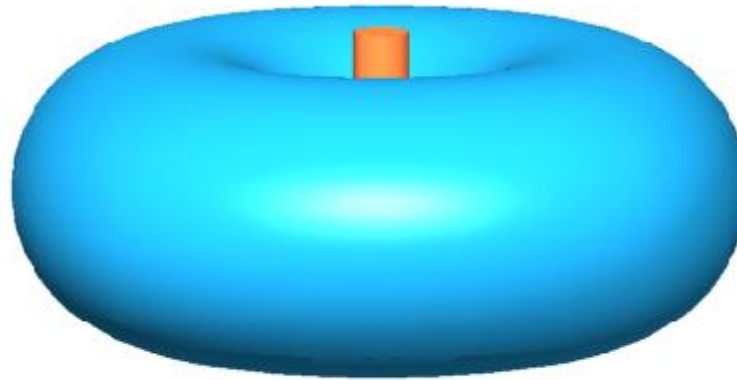
$$P_n(\theta, \varphi) = S(\theta, \varphi) / S_{\max}(\theta, \varphi) = |F(\theta, \varphi)|^2$$

➤ 表征方向图的函数称为方向图函数。

❖ 方向图一般是三维的立体图（球坐标）。

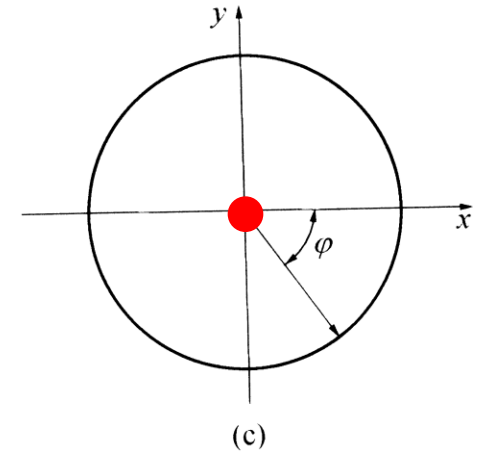
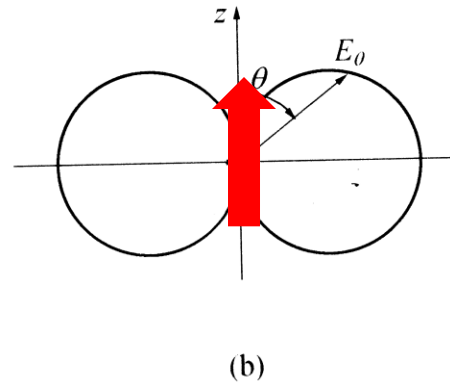
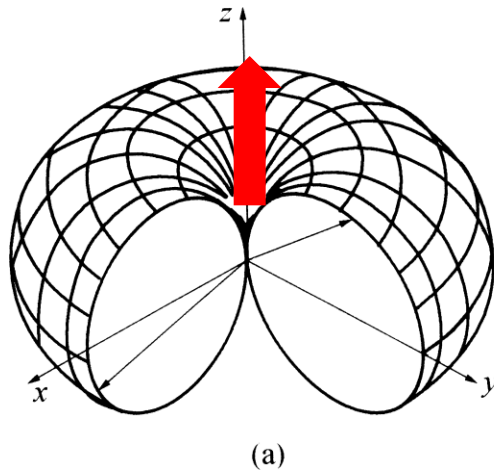


❖ 电流元的立体方向图



$$F_n(\theta) = |E_\theta| / |E_{\max}| = |\sin \theta|$$

$$P_n(\theta, \varphi) = |E_\theta|^2 / |E_{\max}|^2 = \sin^2 \theta$$



$$F_n(\theta) = |\sin \theta|$$

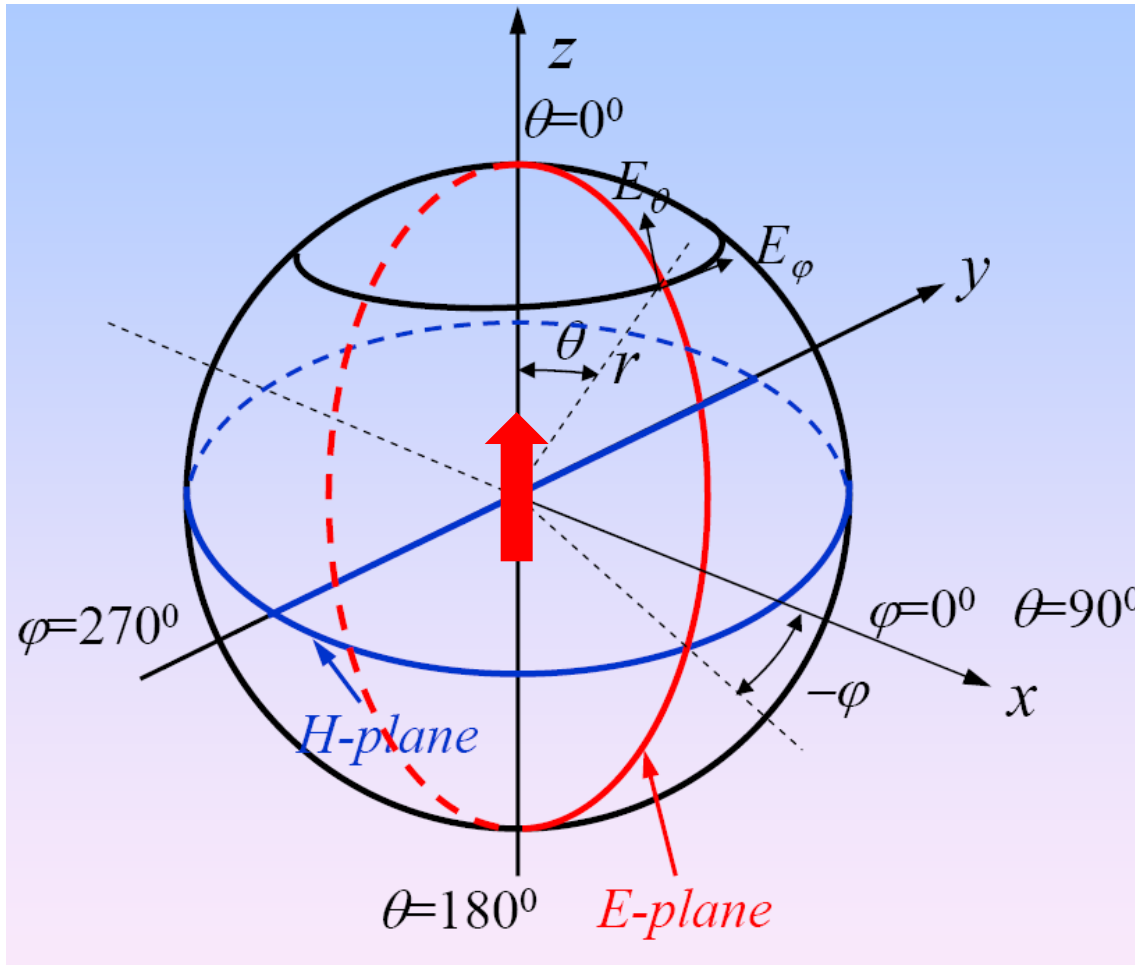
球坐标中， r 坐标为方向图函数，因为辐射场的方向性与径向无关。



- ❖ 实际中，为了表达方便，通常采用通过天线最大辐射方向上的两个相互垂直的平面，即所谓“主平面”来表示方向图。
- ❖ 在超高频天线中，通常采用与远区场矢量相平行的两个主平面，即
 - E平面，即电场矢量所在的平面
 - H平面，即磁场矢量所在的平面



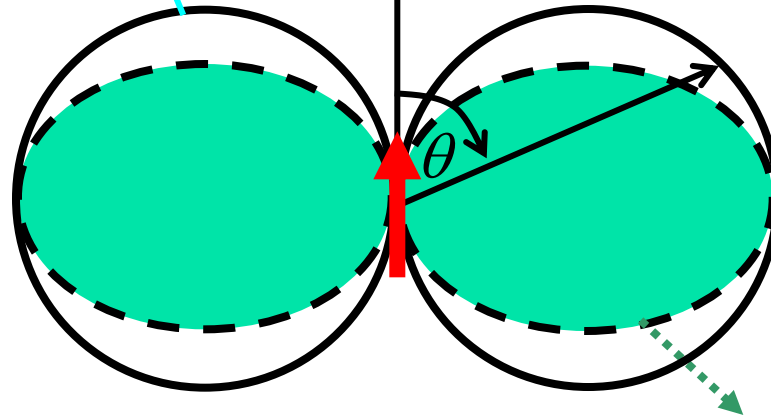
❖ 对于电流元



❖ 沿z方向放置的电流元的E面方向图

场强方向图

$$F_n(\theta) = |E_\theta| / |E_{\max}| = |\sin \theta|$$



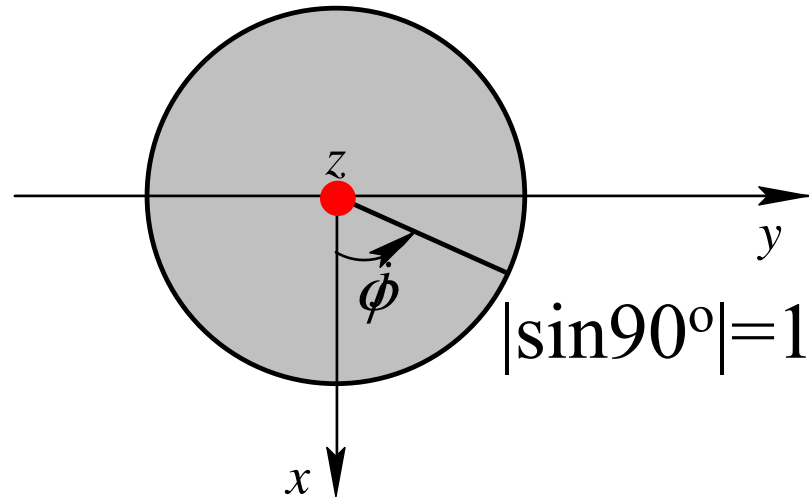
功率方向图

$$P_n(\theta) = |E_\theta|^2 / |E_{\max}|^2 = |\sin \theta|^2$$

E面方向图为8字型

横向（即电流的法向）辐射最大，
纵向（即电流的切向）辐射为零。

❖ 沿z方向放置的电流元的H面方向图



$$F_n(\varphi) = |E_\theta| / |E_{\max}| = |\sin 90^\circ| = 1$$

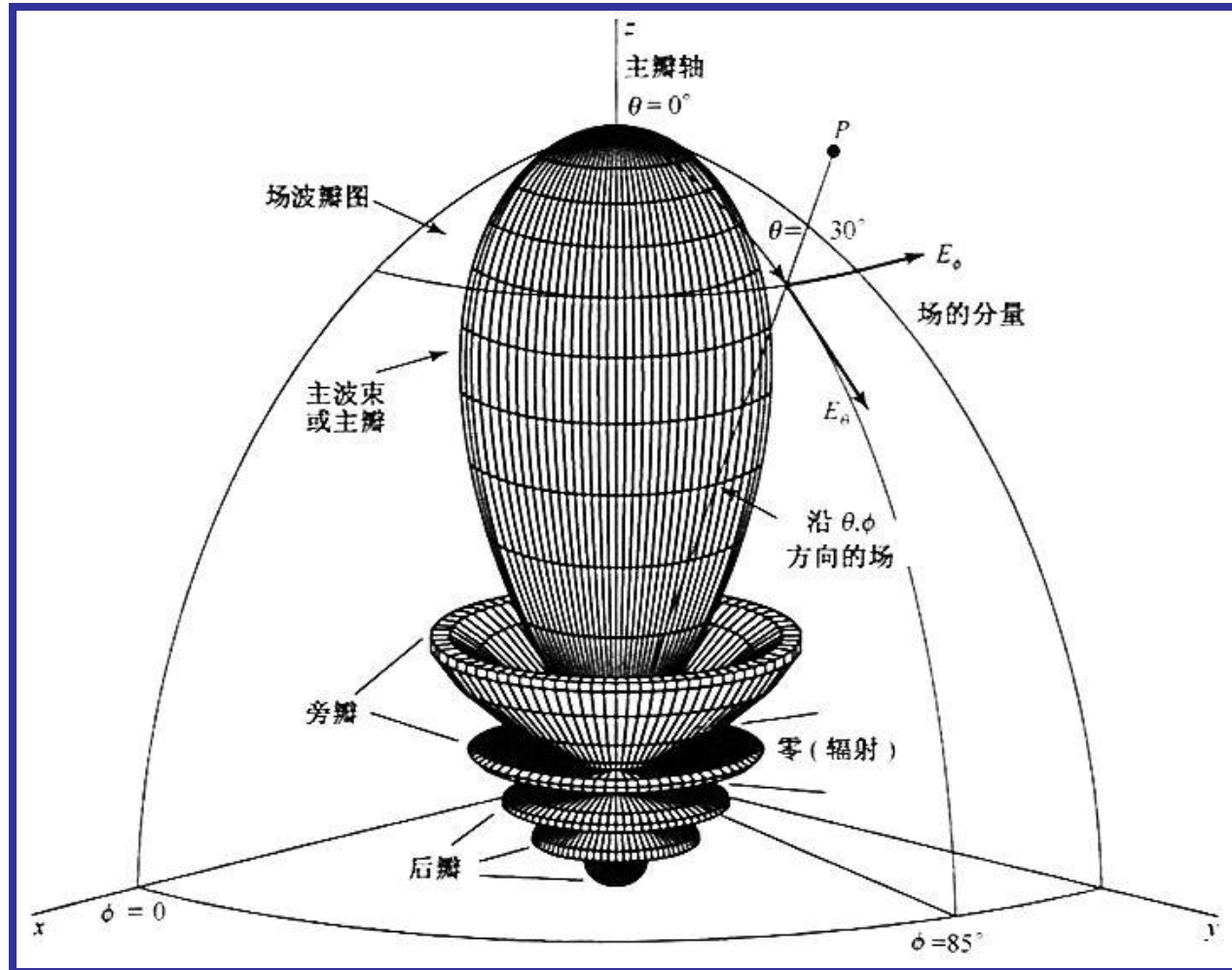
$$P_n(\varphi) = |E_\theta|^2 / |E_{\max}|^2 = |\sin 90^\circ|^2 = 1$$

H面方向图为全向或无方向性





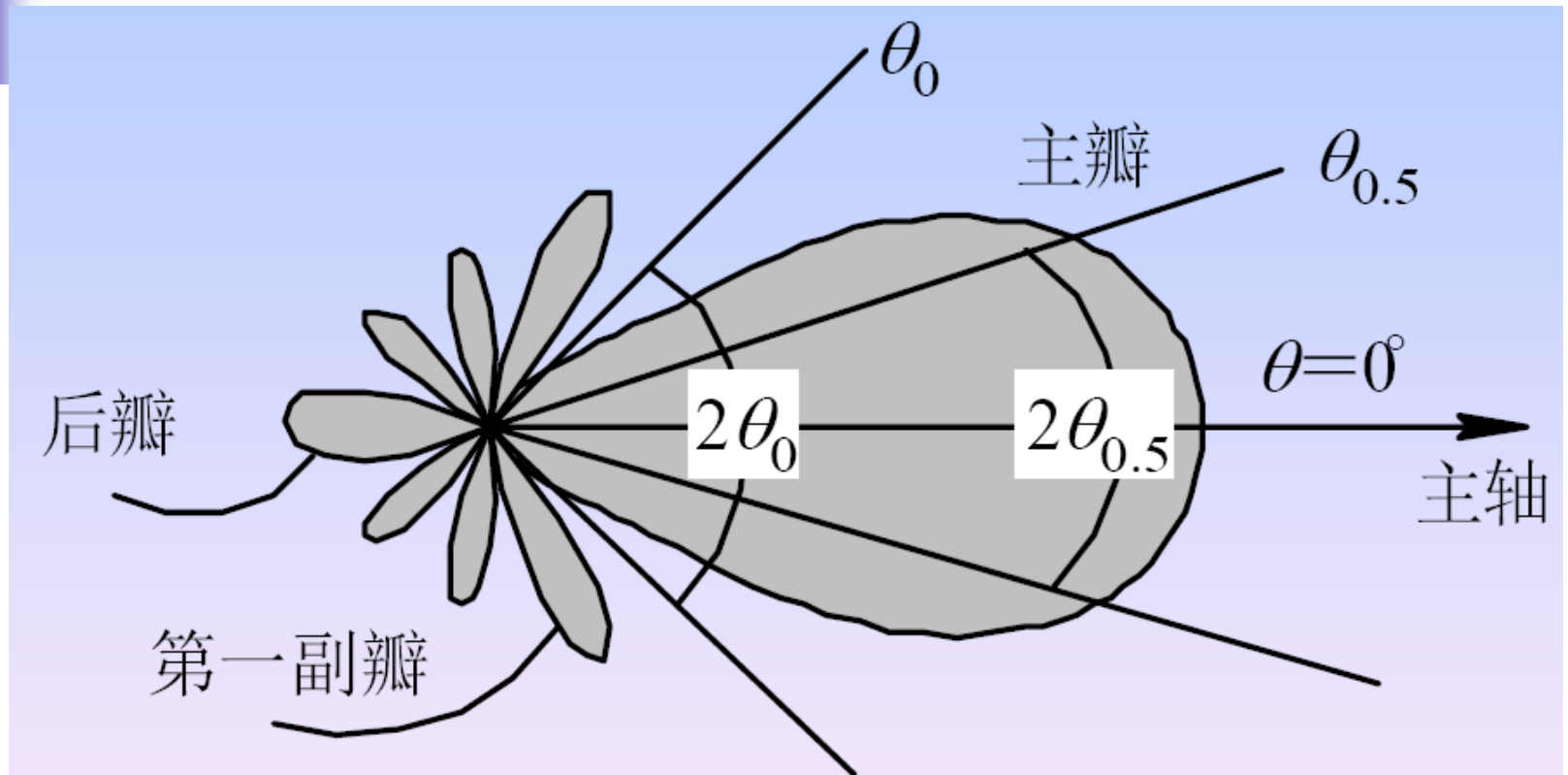
❖ 典型高方向性天线的方向图



波瓣宽度 (lobe width)

- ❖ 天线方向图通常有一个主要最大值和若干次要最大值。头两个零值之间的最大辐射区域是**主瓣**，其他次要的最大值区域都是**旁瓣或副瓣**。
- ❖ **半功率主瓣宽度**：主瓣两个半功率点之间的角度，在场强方向图中，等于最大场强的 $\sqrt{2}$ 的两点之间的角度。
- ❖ **零功率波瓣宽度** $2\theta_0$ ：头两个零点之间的角度。
- ❖ 主瓣宽度愈小，说明天线辐射能量愈集中，定向性愈好。
- ❖ **电流元**： $2\theta_{0.5}=90^\circ$ ， $2\theta_0=180^\circ$





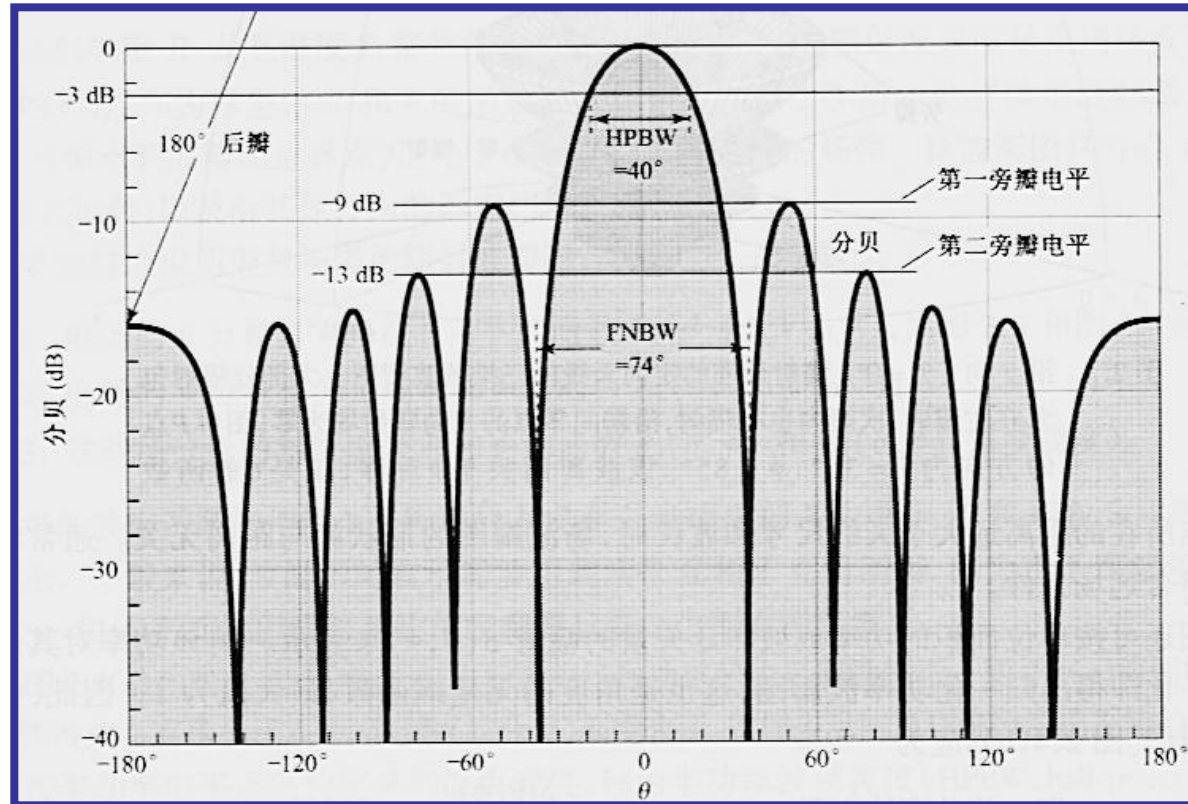
天线方向图的参数含义



- ❖ **旁瓣电平(side lobe level):** 离主瓣最近且电平最高的第一旁瓣的电平，一般以dB表示。通常要求尽可能小。
- ❖ **前后比(front-to-back ratio):** 最大辐射方向(前向)电平与其相反方向(后向)电平之比，通常以dB表示。通常要求尽可能大。



❖ 天线方向图可以用极坐标表示，也可以用直角坐标表示。



用分贝表示的直角坐标方向图



2.3.2 方向系数

- ❖ **方向系数D**：在远场区的球面上，最大辐射功率密度 S_{\max} 与平均辐射功率密度 S_{av} 之比

$$D = \frac{S_{\max}}{S_{av}} = \frac{|E_{\max}|^2}{|E_{av}|^2}$$

- ❖ 也可以说，在远场区的球面上，最大辐射功率流密度与相同辐射功率的无方向天线的辐射功率流密度之比。

$$S_{av} = \frac{1}{4\pi r^2} \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} S(\theta, \phi) \sin \theta r^2 d\theta d\phi$$

$$= \frac{1}{4\pi} \iint_{4\pi} S(\theta, \phi) d\Omega$$

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$$

立体角



❖ 因此

$$D = \frac{4\pi S_{\max}(\theta, \phi)}{\iint_{4\pi} S(\theta, \phi) d\Omega} = \frac{4\pi}{\iint_{4\pi} [S(\theta, \phi) / S_{\max}(\theta, \phi)] d\Omega}$$
$$= \frac{4\pi}{\iint_{4\pi} P_n(\theta, \phi) d\Omega} = \frac{4\pi}{\Omega_A}$$

$$P_n(\theta, \phi) = S(\theta, \phi) / S_{\max}(\theta, \phi)$$

$$\Omega_A = \iint_{4\pi} P_n(\theta, \phi) d\Omega$$

$$\Omega_A S_{\max}(\theta, \phi) = \iint_{4\pi} S(\theta, \phi) d\Omega$$

归一化功率
方向图函数

波束立体角



- ❖ 波束立体角是指所有辐射功率等效地按最大辐射方向功率密度均匀辐射时的立体角。
- ❖ 方向系数等于球面立体角与波束立体角之比。
- ❖ 理想各向同性天线的方向系数为1，但不存在这种天线。所有实际天线方向系数都大于1。
- ❖ 方向系数常用分贝表示，需选择一个参考天线
 - 若以各向同性天线为参考，分贝表示为dBi (isotropy)，即， $D(\text{dBi})=10\log D$
 - 若以半波偶极子(dipole, $D=1.64$)为参考，分贝表示为dBd，即， $D(\text{dBd})=10\log D-2.15$



【例题】 求沿z轴放置的电流元的方向系数。

解：电流元的归一化功率方向图函数为：

$$P_n(\theta, \varphi) = \sin^2 \theta$$

代入方向系数的表达式，得：

$$D = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \sin^2 \theta \cdot \sin \theta d\theta d\phi} = 1.5$$

若以dB表示，则

$$D=10\lg 1.5=1.76 \text{ dBi}$$

可见，电流元的方向系数是很低的。



2.3.3 效率

- ❖ **效率**：天线辐射功率 P_r 与输入功率 P_{in} 之比，记为 η_e ，即

$$\eta_e = \frac{P_r}{P_{in}} = \frac{P_r}{P_r + P_l} \quad P_l \text{ 为欧姆损耗功率}$$

- ❖ 实际中，常用辐射电阻 R_r 来度量天线辐射功率的能力。想象天线辐射的功率都消耗在一个电阻上了，这个电阻就是辐射电阻。设流入天线的电流流过辐射电阻，其损耗的功率等于天线的辐射功率

$$P_r = \frac{1}{2} I^2 R_r$$



❖ 则辐射电阻为

$$R_r = \frac{2P_r}{I^2}$$

❖ 仿照引入辐射电阻的办法, 设损耗电阻 R_l 为

$$R_l = \frac{2P_l}{I^2}$$

❖ 则天线效率为

$$\eta_e = \frac{R_r}{R_r + R_l} = \frac{1}{1 + R_l / R_r}$$

❖ 因此, 要提高天线效率, 应尽可能提高 R_r , 降低 R_l



【例题】确定电流元的辐射电阻。

解：电流元的远区场为

$$E_{\theta} = j \frac{60\pi I l}{r\lambda} \sin\theta d e^{-jkr}$$

辐射功率为

$$P_r = \frac{r^2}{240\pi} \left(\frac{60\pi I l}{r\lambda} \right)^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \sin^2\theta \sin\theta d\theta d\varphi = \frac{1}{2} I^2 R_r$$

所以，辐射电阻为

$$R_r = 80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2$$



讨论

- ❖ 对于电流元 $l \ll \lambda$ ，所以电流元的辐射电阻很小。例如当 $l=1\text{m}$ ， $\lambda=300\text{m}$ ，电流元的辐射电阻仅为 0.0084Ω 。
- ❖ 辐射电阻与长度成正比，与波长成反比。当天线电长度很小时，辐射电阻就很小。



2.3.4 增益

- ❖ 效率没有考虑天线辐射的方向性，而方向系数没有考虑天线的损耗。
- ❖ 同时考虑损耗和方向性的参数是**增益**，定义为

$$G = \eta_e D$$

- ❖ 代入方向系数与效率的定义，得

$$G = \eta_e D = \frac{P_r}{P_{in}} \frac{S_{\max}}{S_{av}} = \frac{S_{\max}}{P_{in} / 4\pi r^2}$$

$$P_r = S_{av} 4\pi r^2$$



- ❖ **因此，更简单的理解：**天线增益就是天线的最大辐射功率密度与把相同的输入功率无方向性地分布在球面上时的功率密度的比值。
- ❖ **增益也可定义为：**在相同输入功率下，天线的最大辐射功率密度与一理想的无方向性无损耗天线在同一点产生的功率密度的比值。



- ❖ 天线的增益系数描述了一个实际天线与理想的无方向性无损耗天线相比，在最大辐射方向上将输入功率放大的倍数。例如，一个输入功率为10W的理想的无方向性无损耗天线与一个增益为10、输入功率为1W的天线在最大辐射方向上具有相同的效果。
- ❖ 因此，当输入功率相同时，高增益天线在最大辐射方向上可以获得更大的辐射功率。



❖ 通过比较待测天线和一个已知增益的参考天线在相同输入功率下所辐射的最大功率密度，就可以测出待测天线的增益。

❖ 因为

$$G(\text{待测天线}) = \frac{S_{\max}(\text{待测天线})}{P_{in} / 4\pi r^2}$$

$$G(\text{参考天线}) = \frac{S_0(\text{参考天线})}{P_{in} / 4\pi r^2}$$

所以

$$G = \frac{S_{\max}(\text{待测天线})}{S_0(\text{参考天线})} G(\text{参考天线})$$



2.3.5 极化

- ❖ 天线的极化定义为天线在最大辐射方向上电磁波的极化。即，在天线最大辐射方向上空间某一固定位置上的电场矢量的末端随时间变化所描绘的轨迹。
- ❖ 该轨迹如果是直线、圆或椭圆，就称为线极化、圆极化或椭圆极化。
- ❖ 线极化可以分为水平、垂直和某角度极化。
- ❖ 圆和椭圆极化都可以分为左旋和右旋。右(左)旋极化天线只能辐射和接收右(左)旋极化波。右(左)旋极化波的反射波是左(右)旋极化的。





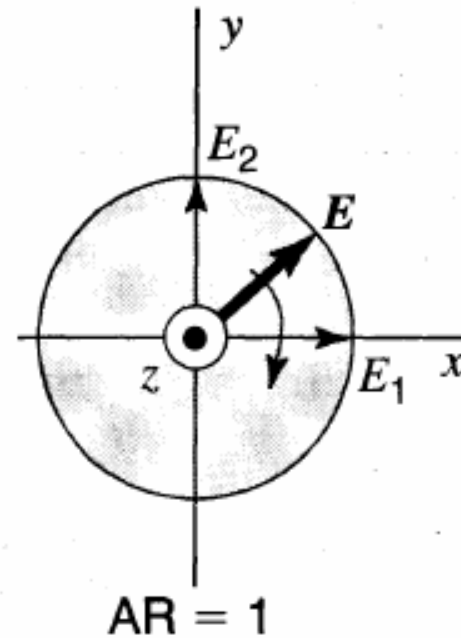
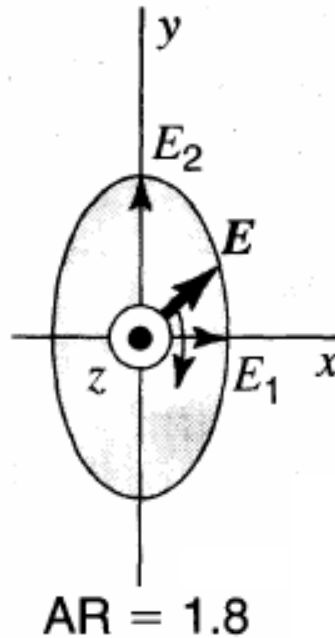
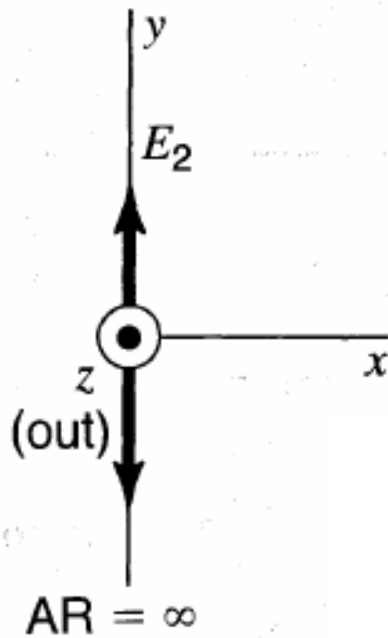
Polarisation of Antenna

$$AR = OA/OB$$

Linear

Elliptical

Circular



❖ 考虑时谐场

电场矢量的末端点轨迹可以用E与x轴的夹角表征。

$$\mathbf{E} = \hat{a}_x E_{xm} \cos(\omega t - \beta z + \varphi_x) + \hat{a}_y E_{ym} \cos(\omega t - \beta z + \varphi_y)$$

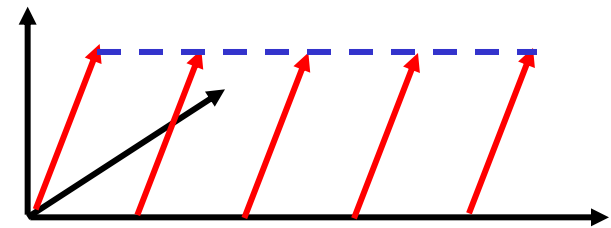
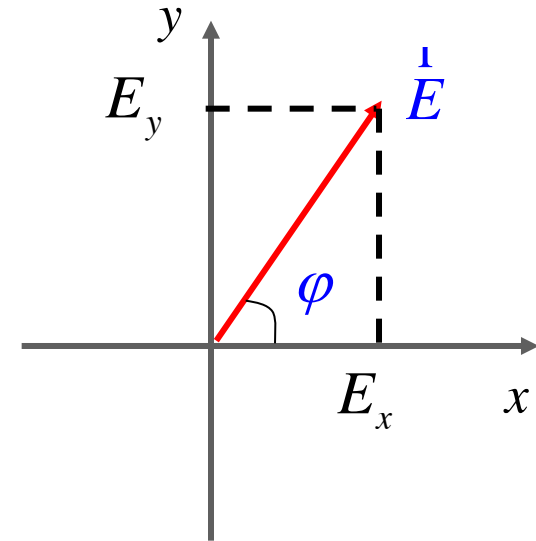
$$\tan \varphi = \frac{E_{ym} \cos(\omega t - \beta z + \varphi_y)}{E_{xm} \cos(\omega t - \beta z + \varphi_x)}$$



【线极化】 如果 $\varphi_x = \varphi_y$ ，即 E_x 、 E_y 同相，则

$$\tan \varphi = \frac{E_{ym}}{E_{xm}}$$

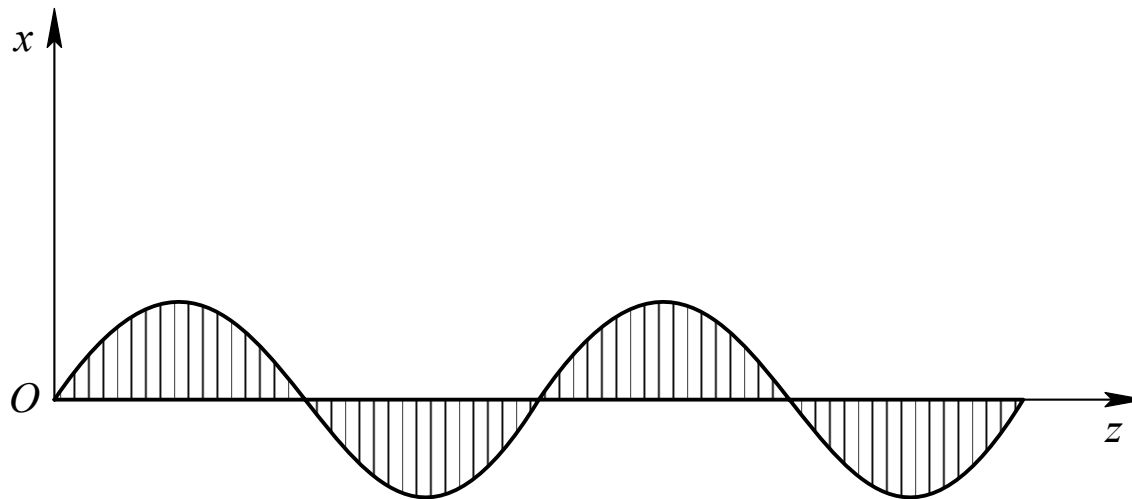
- 夹角不随时间变化。这时E矢量末端点的轨迹不随时间变化，在传播过程中，末端点的轨迹为一直线，故称为线极化。



线天线可用直线电流实现



- ❖ 下图显示了某一时刻，以 $+z$ 轴为传播方向的 x 方向线极化的场强矢量线在空间的分布图。



某一时刻 x 方向线极化的场强矢量线在空间的分布



垂直极化



水平极化



+45度倾斜的极化



-45度倾斜的极化

线极化

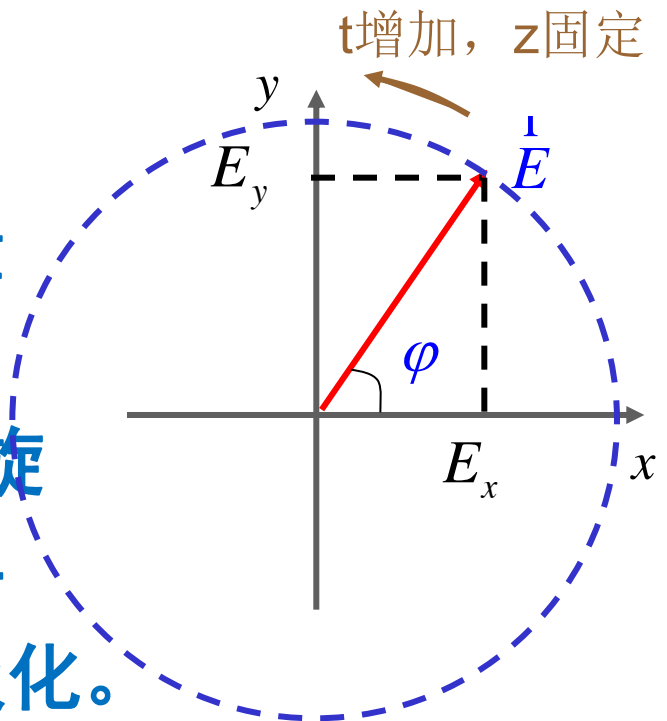


【右旋圆极化】 如果 $E_{xm} = E_{ym}$, $\varphi_y - \varphi_x = -\pi/2$,
 即 E_x 、 E_y 等幅, E_x 超前 E_y 相位 $\pi/2$, 则

$$\tan \varphi = \tan(\omega t - \beta z + \varphi_x)$$

$$\varphi = \omega t - \beta z + \varphi_x$$

❖ 可见, 当 $z = \text{常数}$ 时, E 矢量末端点的轨迹为一圆, 夹角随着时间 t 增加发生旋转, 旋转方向与传播方向构成右手螺旋关系, 故称为右旋圆极化。



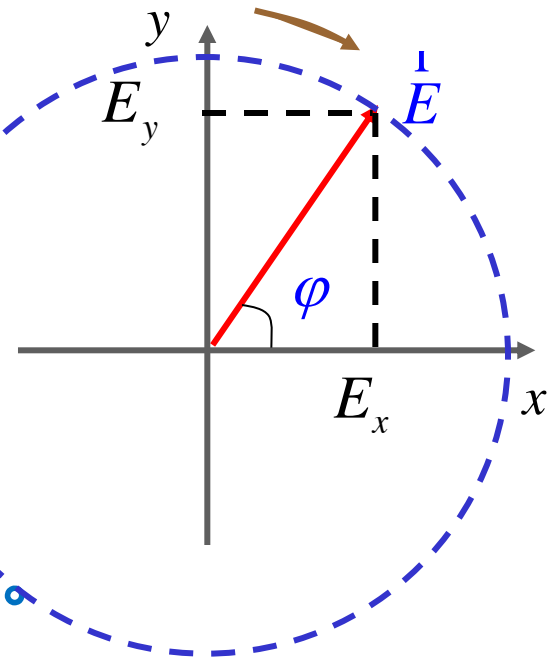
【左旋圆极化】 如果 $E_{xm} = E_{ym}$, $\varphi_y - \varphi_x = \pi/2$,
 即 E_x 、 E_y 等幅, E_x 滞后 E_y 相位 $\pi/2$, 则

$$\tan \varphi = -\tan(\omega t - \beta z + \varphi_x)$$

$$\varphi = -\omega t + \beta z - \varphi_x$$

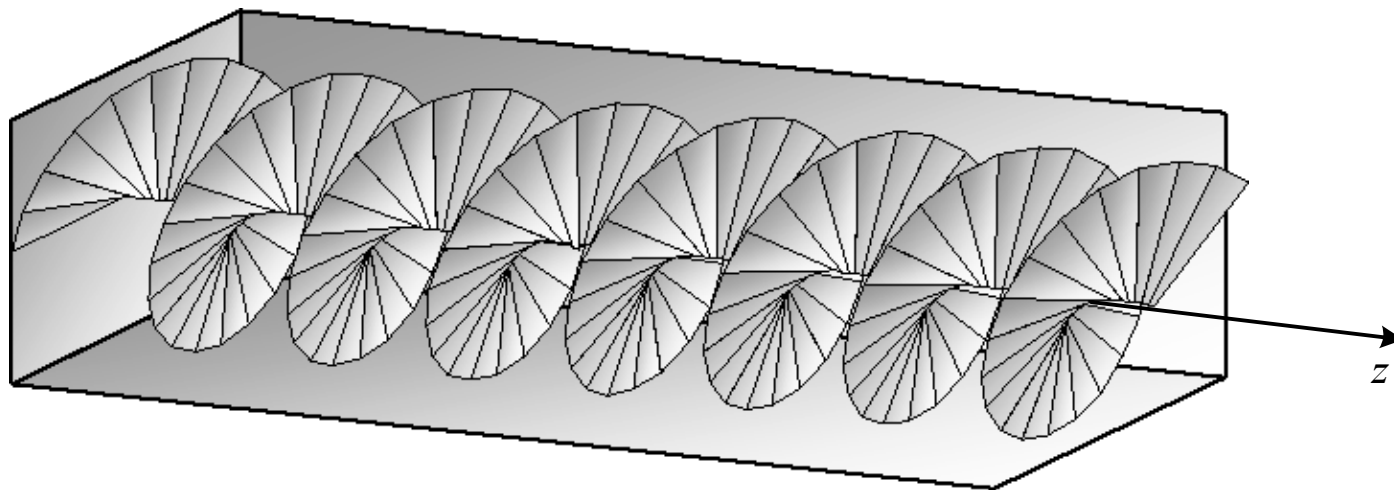
❖ 可见, 当 $z = \text{常数}$ 时, E 矢量
 末端点的轨迹为一圆, 夹角
 随着时间 t 增加发生旋转, 旋
 转方向与传播方向构成左手
 螺旋关系, 故称为左旋圆极化。

t 增加, z 固定



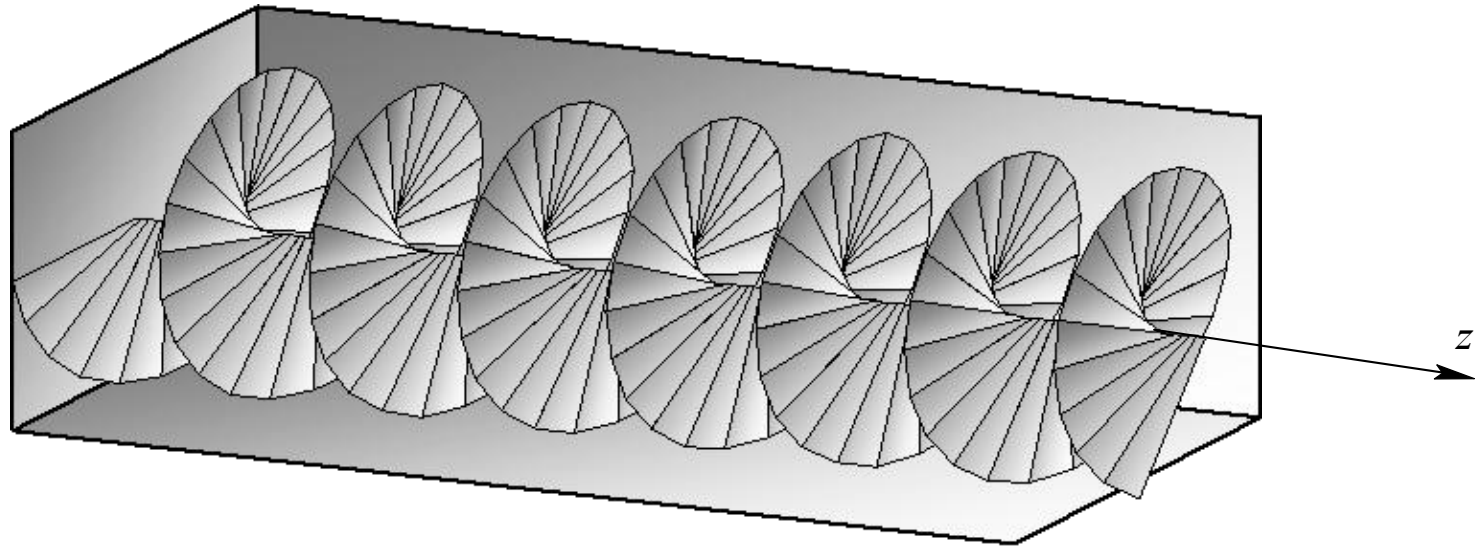


- ❖ 下图是以 $+z$ 轴为传播方向的右旋圆极化的场强矢量线在空间的分布图。要注意到，固定时间的场强矢量线在空间的分布旋向与固定位置的场强矢量线随时间的旋向相反。



某时刻右旋圆极化的场强矢量线在空间的分布图(以 z 轴为传播方向)



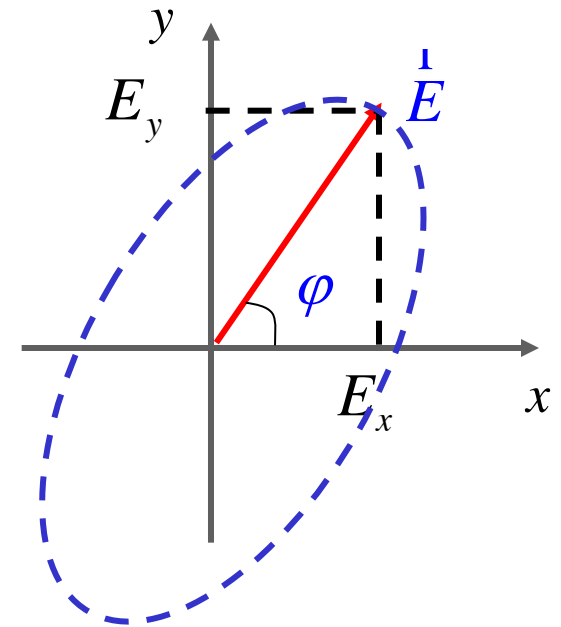


某一时刻左旋圆极化的场强矢量线在空间的分布图 (以z轴为传播方向)

圆极化天线可用两个相互垂直但相差90度的直线电流实现

【椭圆极化】 一般情况下，电场矢量的末端点轨迹是椭圆，所以称为椭圆极化。当 E_x 相位超前 E_y 相位时，为右旋椭圆极化，否则为左旋椭圆极化。

❖ 应当注意，极化的定义是以坐标 z 固定，时间 t 增加时的旋转方向来判断左旋还是右旋的。如果以时间 t 固定，而坐标 z 增加看电场矢量的轨迹，由于 $\omega t - \beta z$ 中 t 与 z 的符号相反，故旋转情况将会相反。





交叉极化

- ❖ 理想情况下，线极化意味着只有一个方向，但实际中，总是难免有其他的分量。
- ❖ 对于线极化，交叉极化决定了极化的纯度。例如一个垂直极化天线，交叉极化电平(cross polarization level)是由于在水平方向有电场分量，一般交叉极化电平是一个测量值，它比同极化电平(co-polarization level)要小。



轴比

- ❖ 表征极化的参数是**轴比**：电场最大值与最小值之比。
- ❖ 圆极化轴比为1，线极化轴比为无穷大，椭圆极化轴比大于1.



- ❖ 线极化天线结构简单、容易实现，因此得到广泛应用。但也最容易受到干扰，有些应用中风险大、衰减大。
- ❖ 圆极化天线的一个显著优点是如果入射波是右旋圆极化波，则反射波就是左旋圆极化波，而左旋与右旋圆极化波互不干扰。



习题2

2-1 某天线的场方向图为

$$F(\theta, \varphi) = \frac{\sin \theta}{\theta} \frac{\sin \varphi}{\varphi}$$

- (a) 画出作为 θ 函数的归一化功率方向图
- (b) 计算该天线的方向系数。

