专题三： 对称振子

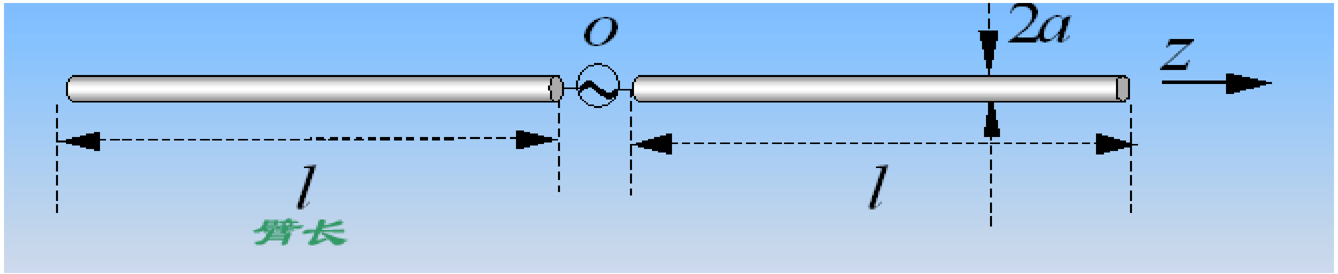
（Symmetrical Center-Fed Dipole）

Dipoles

- 对称振子——最**基本**、最**常用**的天线形式

专题三： 对称振子

对称振子：



导线半径：a

单臂长：l

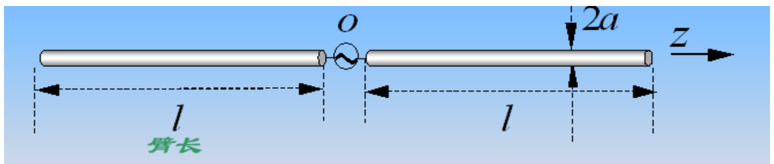
对称振子总长度：$L=2l$

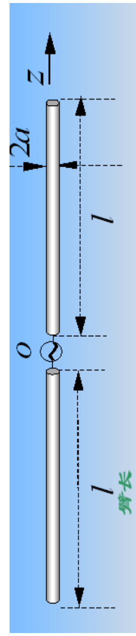
主要内容：

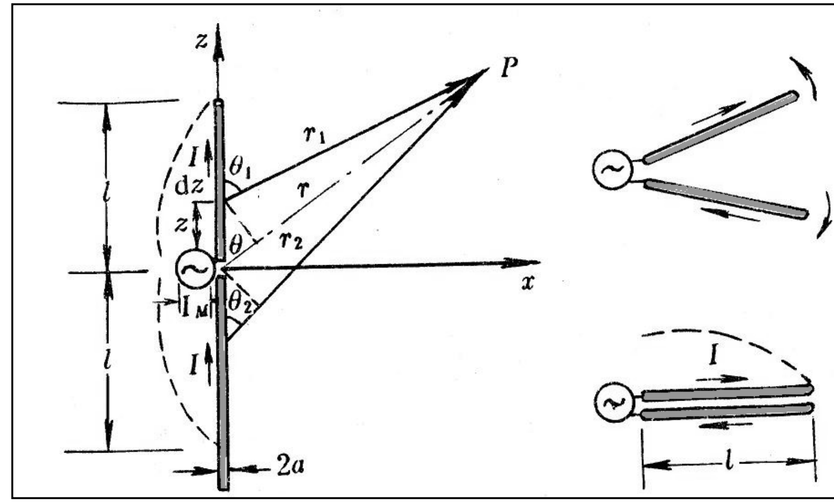
1. 电流分布
2. 辐射场（远区场）及远区条件
3. 方向图
4. 辐射电阻
5. 方向系数
6. 输入阻抗

专题三： 对称振子

1. 对称振子的电流分布







对称振子可看成是终端开路的双线传输线张开而成；

因此**对称振子上的电流近似于正弦分布**(条件：细振子，$a << \lambda$)：

$$I = \begin{cases} I_M \sin[k(l-z)] & z>0 \\ I_M \sin[k(l+z)] & z<0 \end{cases}$$

即 $\boxed{I = I_M \sin[k(l-|z|)]}$ ●对称振子上为驻波电流分布；

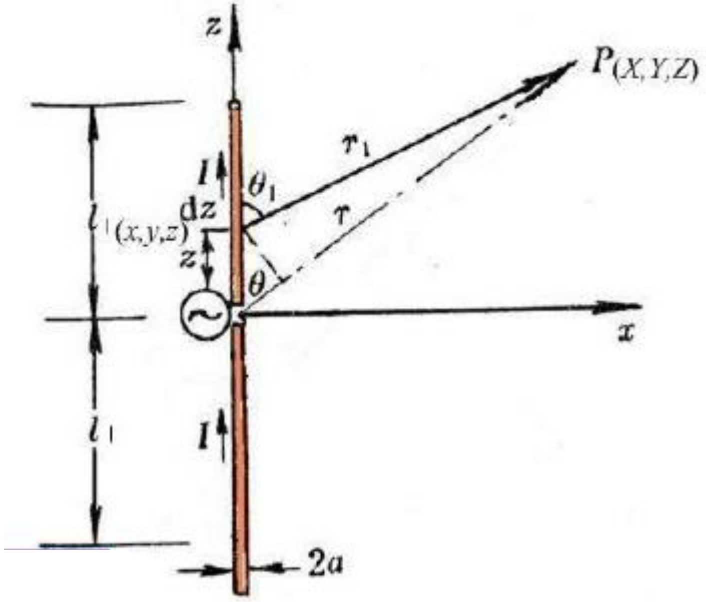
专题三： 对称振子

2. 对称振子的辐射场（远区场）及远区条件

电基本振子的远区条件：$kr >> 1$

对称振子的远区条件： $r \rangle\rangle L$， $r \rangle\rangle \dfrac{\lambda}{2\pi}$， $r \ge \dfrac{2L^2}{\lambda}$

将对称振子的辐射看成许多基本振子辐射的叠加，利用叠加原理得出对称振子的远区场。



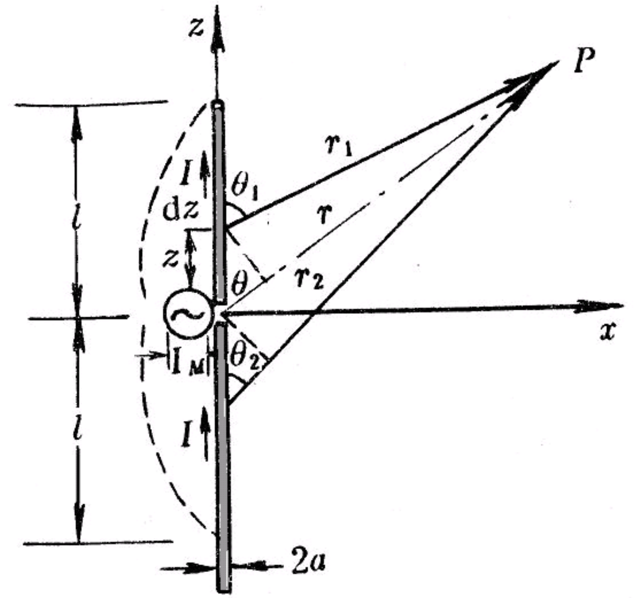
基本振子的辐射电场：

$$\overline{E}_\theta = \hat{\theta}E_\theta = \hat{\theta}\ j\frac{60\pi Il}{\lambda r}\sin\theta e^{-jkr}$$

专题三： 对称振子

基本振子的辐射场：

$$\overline{\mathrm{E}}_{\theta}=\hat{\theta}E_{\theta}=\hat{\theta}\ j\frac{\eta Il}{2\lambda r}\sin\theta e^{-jkr}$$



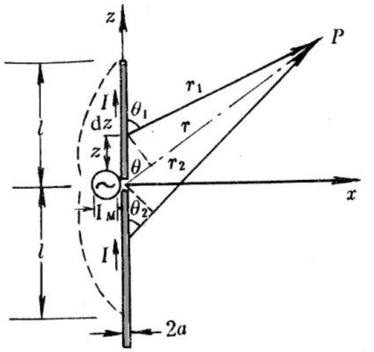
- 对称振子上臂离中心z处，取一小段dz，其上的电流为I，此基本振子在远区P点产生的远区场：

$$d\overline{E}_1=\hat{\theta}_1 j\frac{60\pi Idz}{\lambda r_1}\sin\theta_1 e^{-jkr_1}$$

- 对称振子下臂上-|z|处有关于中心对称的一段dz，它在远区场点P产生的辐射场：

$$d\overline{E}_2=\hat{\theta}_2 j\frac{60\pi Idz}{\lambda r_2}\sin\theta_2 e^{-jkr_2}$$

专题三： 对称振子



由远区的近似条件，做数学处理：

一般天线的远区要加上一个条件，即各源点至远区场点的射线可看成是平行的：

$r_1 // r // r_2$

则

（1） $\theta_1 \approx \theta_2 \approx \theta,\qquad \hat{\theta}_1 \approx \hat{\theta}_2 \approx \hat{\theta}$

（2） $r_1 \approx r - |z|\cos\theta,\qquad r_2 \approx r + |z|\cos\theta$

（3） $1/r_1 \approx 1/r \approx 1/r_2$

$$d\bar{E}_1 = \hat{\theta}_1 j \frac{60\pi I dz}{\lambda r_1} \sin\theta_1 e^{-jkr_1}$$

$$d\bar{E}_2 = \hat{\theta}_2 j \frac{60\pi I dz}{\lambda r_2} \sin\theta_2 e^{-jkr_2}$$

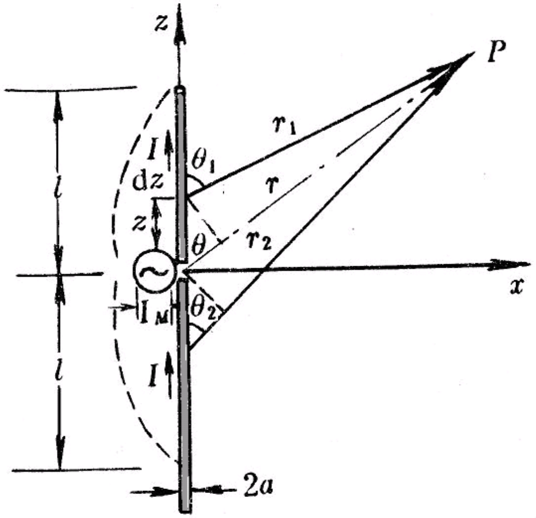
注意：

$r >> |z|\cos\theta$，因而对 $1/r_1, 1/r_2$ 可以忽略，

但是对于相位因子，取决于 $(2\pi/\lambda)|z|\cos\theta$，$|z|\cos\theta$ 不能忽略，因为它与波长在同一数量级。

- 由上，$d\bar{E}_1$ 和 $d\bar{E}_2$ 近似认为都在 $\hat{\theta}$ 方向，矢量和化为代数和。

专题三： 对称振子



$$
\begin{aligned}
d\overline{E}_\theta &= d\overline{E}_1 + d\overline{E}_2 \\
&= j\frac{60\pi I dz}{\lambda r}\sin\theta e^{-jkr}[e^{jk|z|\cos\theta} + e^{-jk|z|\cos\theta}] \\
&= j\frac{60\pi I_M \sin[k(l-|z|)]dz}{\lambda r}\sin\theta e^{-jkr}2\cos(k|z|\cos\theta)
\end{aligned}
$$

总的辐射电场就是对对称振子的半臂求积分:

$$
E_\theta = \int_0^l dE_\theta = j\frac{\eta I_M \sin\theta e^{-jkr}}{\lambda r}\int_0^l \sin[k(l-|z|)]\cos(k|z|\cos\theta)dz
$$

$$
= j\frac{60 I_M}{r}\frac{\cos(kl\cos\theta)-\cos kl}{\sin\theta}e^{-jkr}
$$

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

专题三： 对称振子

- **对称振子辐射场的特点**

$$E_\theta = j\frac{60\mathrm{I_M}}{r}\frac{\cos(kl\cos\theta)-\cos kl}{\sin\theta}e^{-jkr}$$

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

（1）场的**方向**：电场只有 E_θ 分量，磁场只有 H_φ分量，是横电磁波；

（2）场的**相位**：以振子中点为相位中心的球面波，磁场与电场同相；

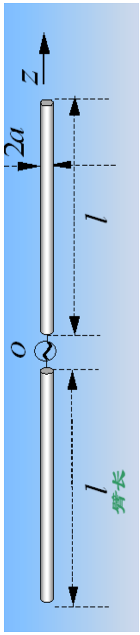
（3）场的**振幅**：与距离r成反比，与电流幅值 I_M成正比，与场点的方向 θ 有关，即具有方向性。

- 对称振子的这些特点基本上与电基本振子辐射场的特点相同。

专题三： 对称振子

例： 半波振子 $2l = \lambda / 2$

$$\begin{cases} E_\theta = j\dfrac{60I_M}{r}\dfrac{\cos(\dfrac{\pi}{2}\cos\theta)}{\sin\theta}e^{-jkr} \\ H_\varphi = \dfrac{E_\theta}{\eta_0} \end{cases}$$



- 在所有对称振子中，半波振子最具有实用性，广泛用于短波及超短波波段；
- 可以作为独立天线，也可作为天线阵的元天线，还可作为微波波段天线的馈源；

3. 对称振子的方向图

$$E_\theta = j\frac{60\mathbf{I_M}}{r}\frac{\cos(kl\cos\theta)-\cos kl}{\sin\theta}e^{-jkr}$$

（1）对称振子的方向函数

由对称振子的辐射场表达式，**(未归一化)方向函数：**

$$f(\theta,\ \varphi)=\frac{|E(\theta,\ \varphi)|}{\frac{60I_M}{r}}=\frac{\cos(kl\cos\theta)-\cos kl}{\sin\theta}$$

对称振子归一化方向函数：

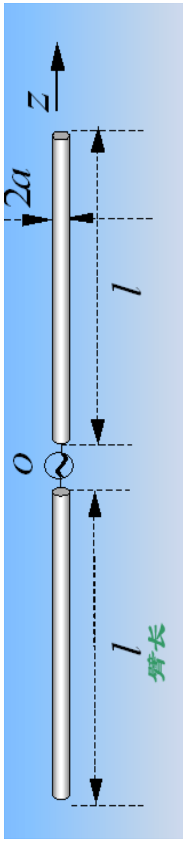
$$F(\theta,\ \varphi)=\frac{f(\theta,\ \varphi)}{f_M}$$

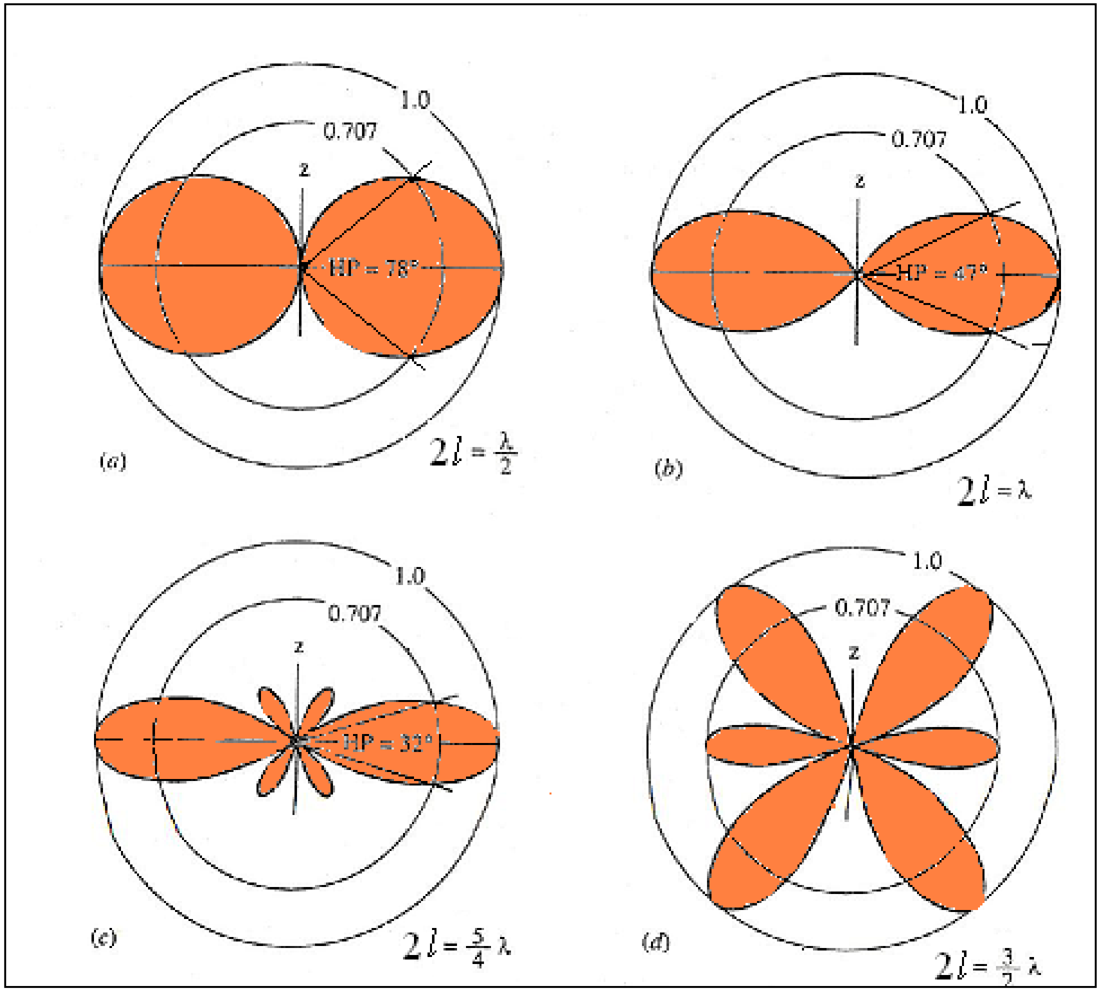
半波振子归一化方向函数：

$$F(\theta,\varphi)=f(\theta,\varphi)=\frac{\cos(\frac{\pi}{2}\cos\theta)}{\sin\theta}$$

专题三： 对称振子

（2）对称振子方向图

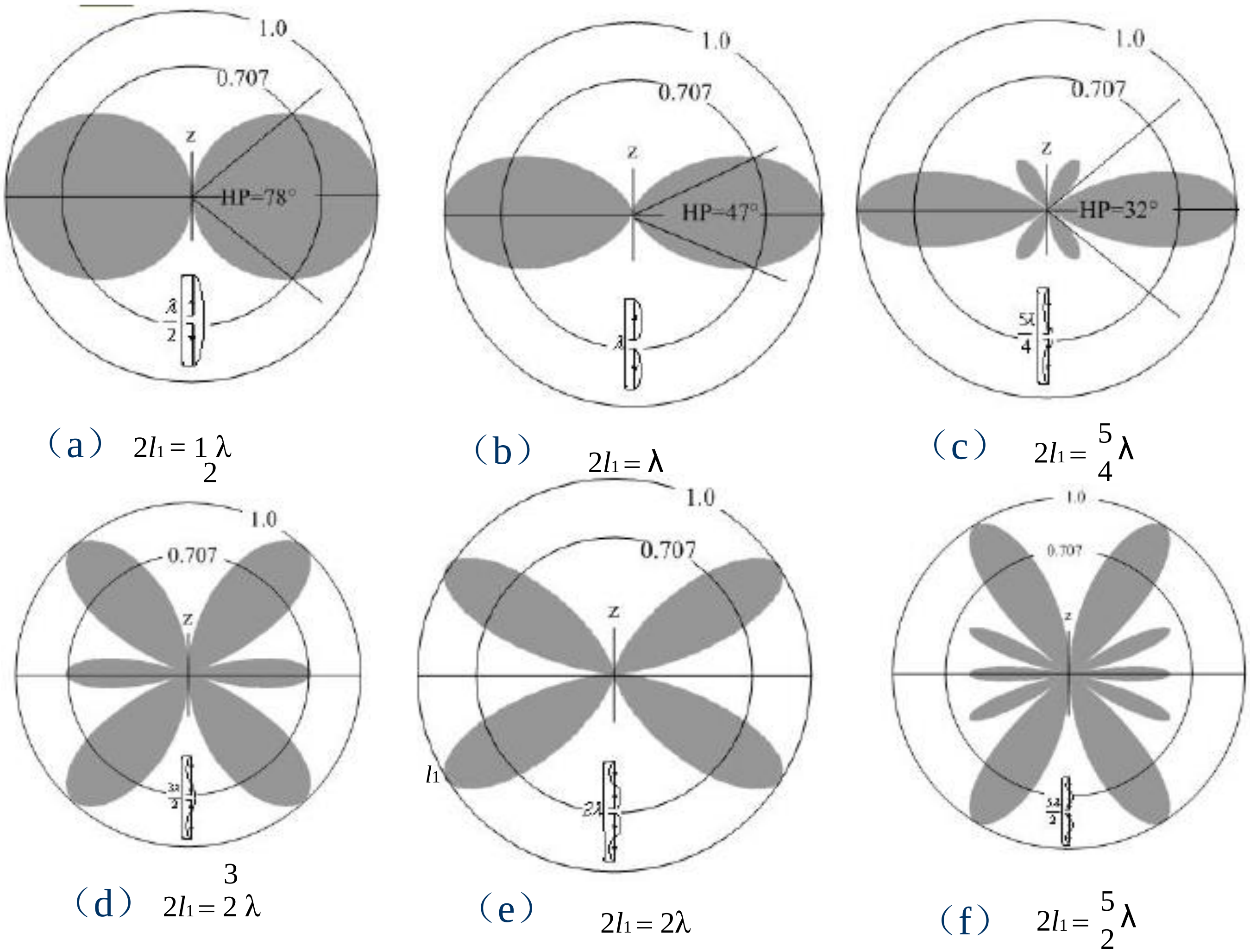




不同长度对称振子的E面方向图

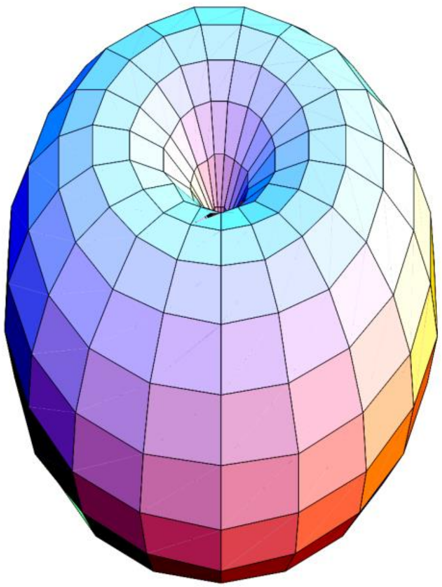
为什么对称振子方向图会随臂长变化？ $2l=2\lambda$ **时方向图如何？**

专题三： 对称振子

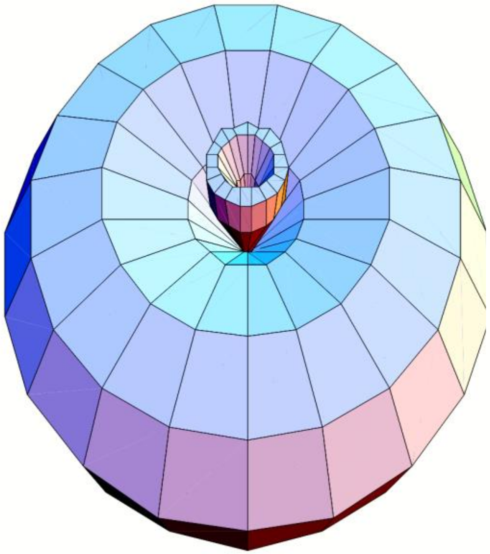


不同长度对称振子的E面方向图

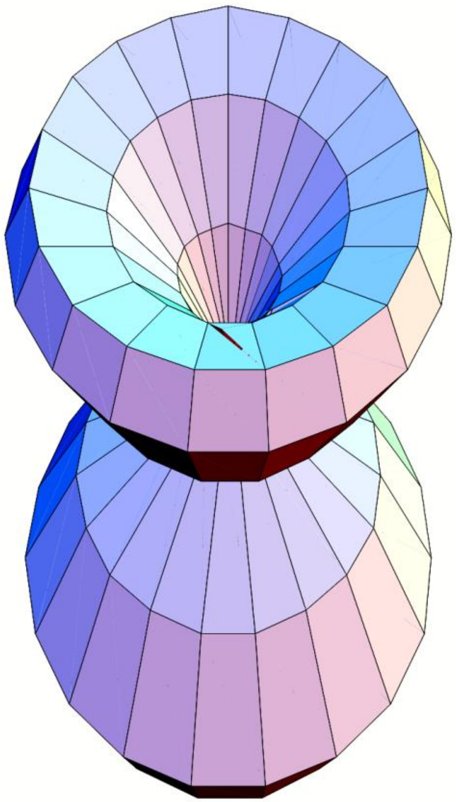
专题三： 对称振子



$$2l = \frac{\lambda}{2}$$



$$2l = \frac{5\lambda}{4}$$



$$2l = 2\lambda$$

不同长度对称振子三维方向图

专题三： 对称振子

L = 0

动画：对称振子方向图随臂长的变化

4. 辐射电阻

对称振子的辐射功率:

$$P_r=\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}\frac{|E_\theta|^2}{2\eta_0}r^2\sin\theta d\theta d\varphi=30I_M^2\int_0^{\pi}\frac{[\cos(kl\cos\theta)-\cos kl]^2}{\sin\theta}d\theta$$

因而辐射电阻为:

$$R_r=\frac{2P_r}{I_M^2}=60\int_0^{\pi}\frac{[\cos(kl\cos\theta)-\cos kl]^2}{\sin\theta}d\theta$$

可见辐射电阻与对称振子的电长度有关，用数值积分可以计算出这个积分。

如：**半波振子** $2l=\lambda/2$ $R_r=73.1\Omega;$

全波振子 $2l=\lambda$： $R_r=200\Omega.$

专题三： 对称振子

5. 对称振子的方向系数

$$D=\frac{E_M^2 r^2}{60P_r}=\frac{\left(\frac{60I_M}{r}f_M\right)^2}{60\cdot\frac{1}{2}I_M^2R_r}=\frac{120f_M^2}{R_r}$$

当 $l\le 0.625\lambda$：

$$f_M=f\left(\theta=90^\circ\right)=1-\cos kl$$

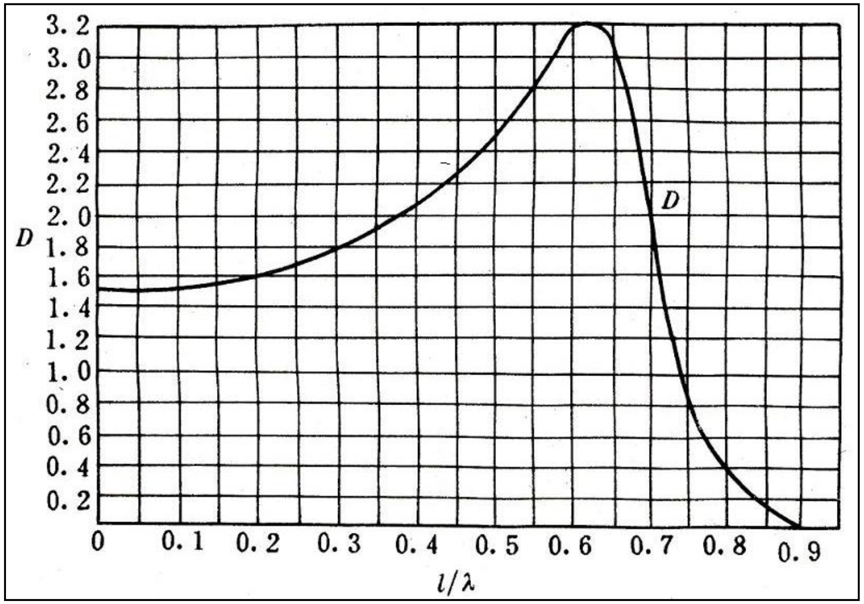
得 $$D=\frac{120(1-\cos kl)^2}{R_r}$$

半波振子

$$D=\frac{120\times 1^2}{73.1}=1.64 \qquad D_{dB}=10\lg 1.64=2.15dB$$

全波振子

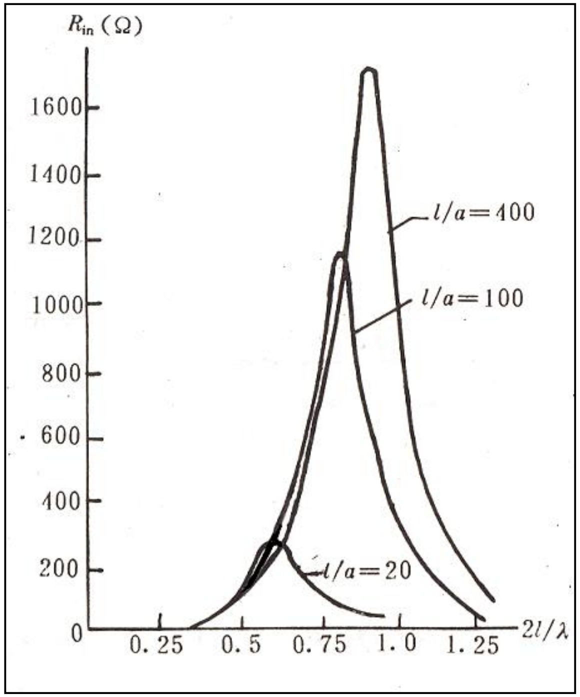
$$D=\frac{120\times 2^2}{200}=2.4 \qquad D_{dB}=10\lg 2.4=3.80dB$$



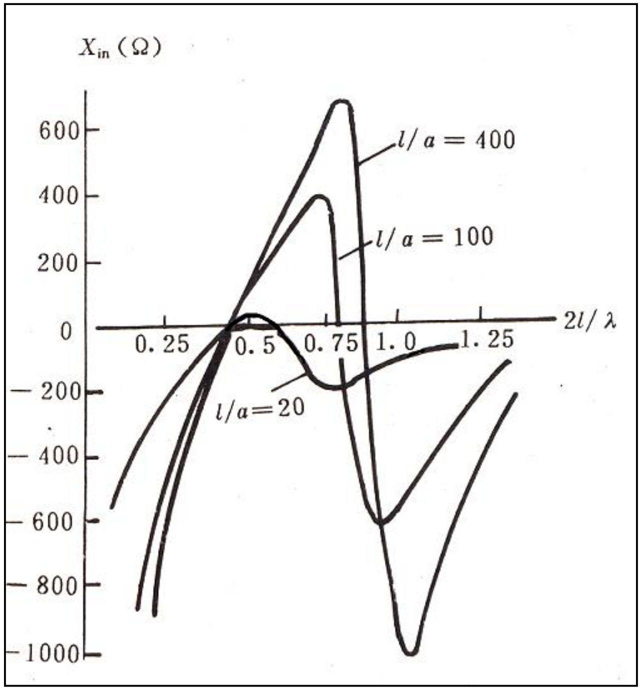
对称振子的方向性系数（θ=90° 方向）

6. 对称振子的输入阻抗

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



对称振子Rin~ 2l/λ　实验曲线

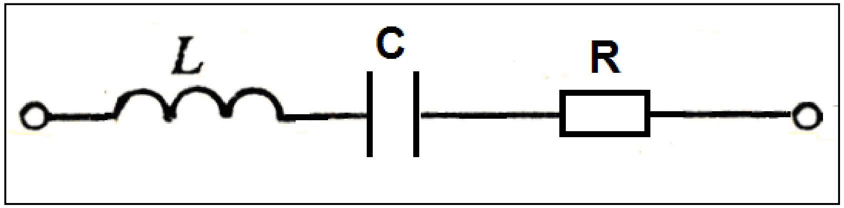


对称振子Xin~ 2l / λ　实验曲线

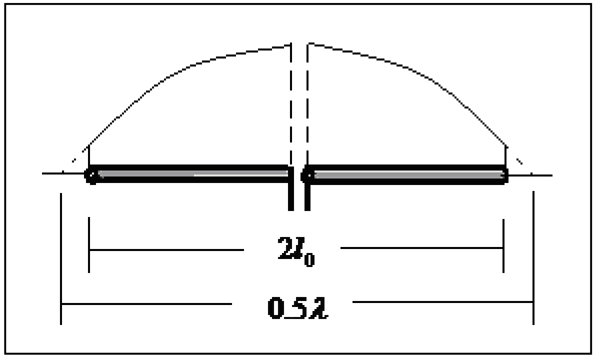
专题三： 对称振子

1) 当 $2l/\lambda \approx 0.5$ (半波振子)， $X_{in} \doteq 0$

谐振状态：较短时，呈容性；更长时为感性。故阻抗等效电路为RLC串联谐振电路：



2）谐振长度稍小于 $\lambda/2$ 见表。这是因为两端堆积电荷，等效于延伸了长度：



半波振子的谐振长度

l/a	$2l_0$	缩短的百分比
5000	0.049λ	2%
50	0.475λ	5%
10	0.455λ	9%

- 振子愈粗，l/a 愈小，则谐振长度 $2l_0$ 愈短，即缩短得愈多。
- 实际尺寸一般设计为谐振长度，以使输入阻抗为纯电阻，便于馈线匹配。

专题三： 对称振子

3)振子愈粗, l/a 越小，谐振曲线越平坦，相当于谐振电路的Q值越低，工作频带将越宽。

4)天线输入阻抗就是其馈线的负载阻抗，它决定馈线的驻波状态(参看图)。

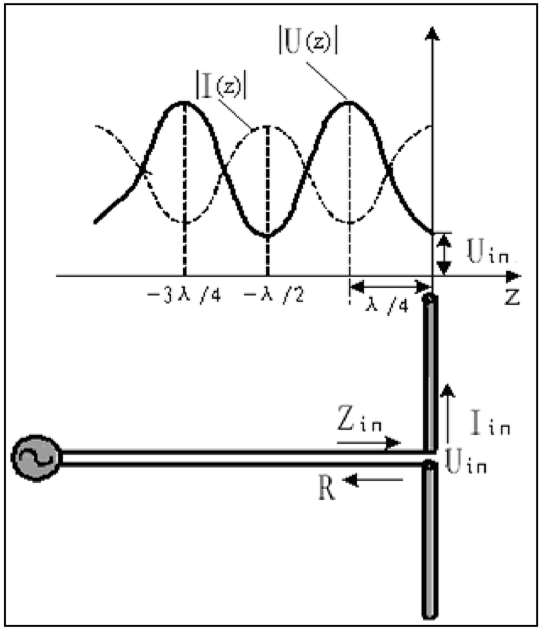
馈线的驻波状态用**电压驻波比**(VSWR—Voltage Standing Wave Ratio) S作为指标：

$$S=\frac{1+|R|}{1-|R|}=1(\text{匹配})-\infty(\text{失配})$$

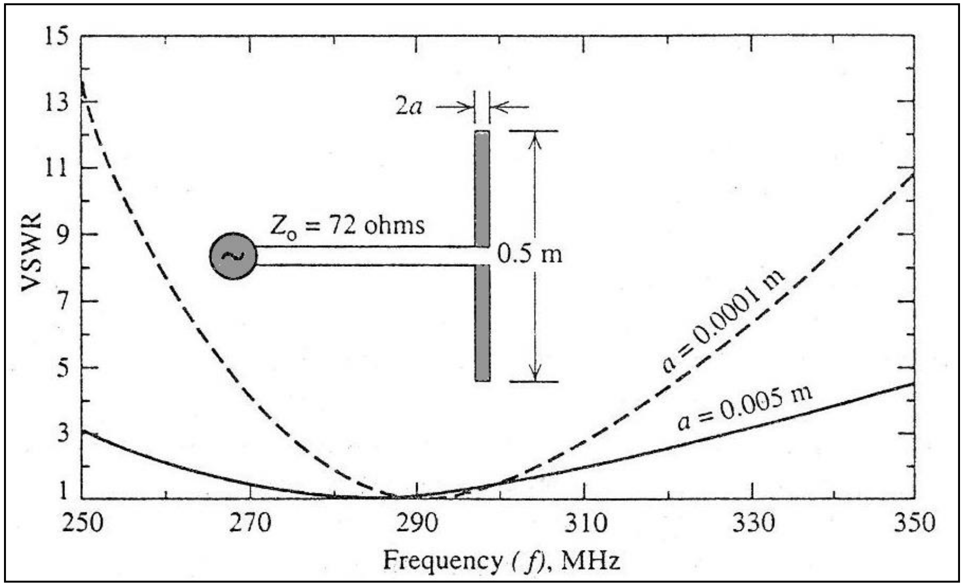
$$R=\frac{Z_{in}-Z_c}{Z_{in}+Z_c},\qquad Z_c-\text{馈线特性阻抗}$$

阻抗匹配效率为： $q=1-|R|^2=1-\left(\frac{S-1}{S+1}\right)^2=\frac{4S}{(S+1)^2}$

通常要求 $S\le 2$ 。对应于$|R|^2\le 11.1\%$ ，即 $q\ge 88.9\%$ 。



天线馈线上的行驻波



半波振子电压驻波比的计算曲线

由图可见,

a=5mm(l/a=50)， $B_1(s\le 2)=310-262=48MHz$, $B_{r1}(s\le 2)=\dfrac{48}{300}\times 100\%=16\%$

a=0.1mm(l/a=2500)， $B_2(s\le 2)=304-280=24MHz$, $B_{r2}(s\le 2)=\dfrac{24}{300}\times 100\%=8\%$

- 振子粗，频带宽 。如工作于短波的笼形天线：