

第3章 行波天线

3.1 行波单导线及菱形天线

3.1.1 行波单导线(重点)

3.1.2 菱形天线(重点)

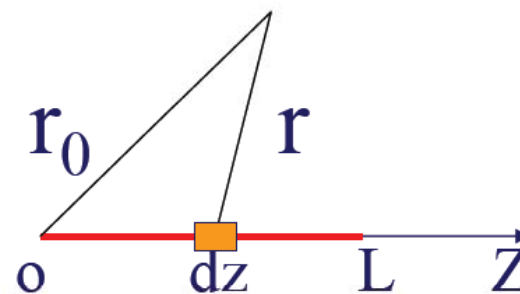
3.1.3 行波V形天线

3.1.4 低架行波单导线

3.1.1 行波单导线(重点)

$$I_z = I_0 e^{-jkz}$$

$$dE_\theta = \frac{j60\pi I_z dz}{r_0 \lambda} \sin\theta e^{-jk(r_0 - z \cos\theta)}$$



$$E_\theta = \int_0^L dE_\theta = j \frac{60I_0}{r_0} e^{-j\beta r_0} \frac{\sin\theta}{1 - \cos\theta} \sin\left[\frac{kL}{2}(1 - \cos\theta)\right] e^{-j\frac{kL}{2}(1 - \cos\theta)}$$

$$H_\varphi = \frac{E_\theta}{120\pi}$$

$$E_r = E_\varphi = H_r = H_\theta = 0$$

行波天线

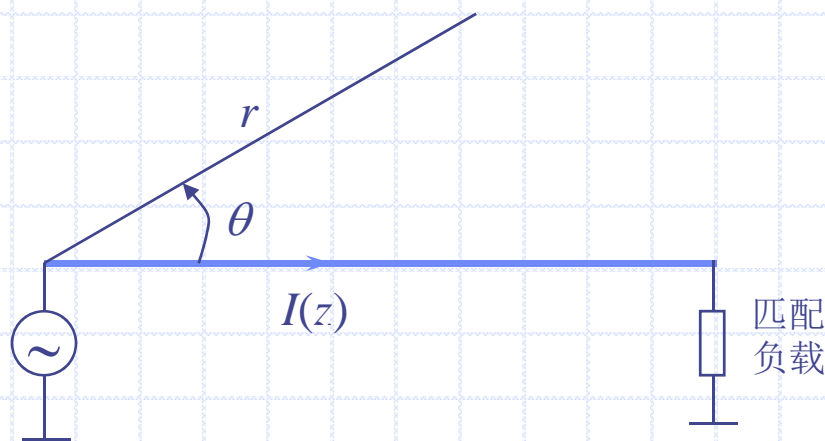
前面讲的振子型天线，其上电流为驻波分布，如对称振子的电流分布为：

$$I(z) = I_m \sin \beta(h - z) = \frac{I_m}{2j} e^{j\beta h} (e^{-j\beta z} - e^{j\beta z})$$

式中，第一项表示从馈电点向导线末端传输的行波；第二项表示从末端反射回来的从导线末端向馈电点传输的行波，负号表示反射系数为-1。

当终端不接负载时，来自激励源的电流将在终端全部被反射，这样，振幅相等、传输方向相反的两个行波叠加就形成了驻波。凡天线上电流分布为驻波的均称为驻波天线(standing-wave antenna)。驻波天线是双向辐射的，输入阻抗具有明显的谐振特性，因此，一般情况下工作频带较窄。

如果天线上电流分布是行波，则此天线称为行波天线。通常，行波天线(**traveling-wave antenna**)是由导线末端接匹配负载来消除反射波而构成。最简单的有：行波单导线天线、V形天线和菱形天线等，它们都具有较好的单向辐射特性、较高的增益及较宽的带宽，因此在短波、超短波段都获得了广泛的应用。但由于部分能量被负载吸收，所以天线效率不高。



1. 行波单导线天线的方向图

若天线终端接匹配负载，则天线上电流为行波分布：

$$I(z) = I_0 e^{-j\beta z}$$

忽略地面的影响，行波天线的辐射场为：

$$E_\theta = \frac{j60\pi}{\lambda r} \sin \theta e^{-j\beta r} \int_0^l I(z) e^{j\beta z \cos \theta} dz$$

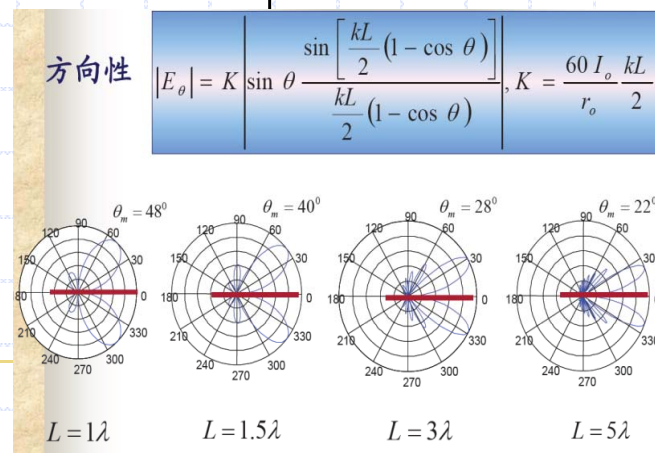
经积分得：

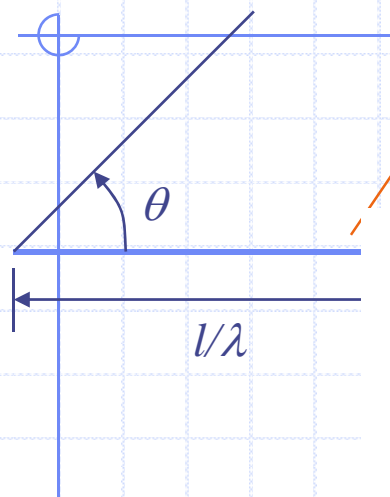
$$E_\theta = \frac{j60\pi I_0}{\lambda r} \cdot \frac{\sin \theta}{1 - \cos \theta} \cdot \sin \left[\frac{\beta l}{2} (1 - \cos \theta) \right] e^{-j\beta \left[r + \frac{l}{2} (1 - \cos \theta) \right]}$$

因而，单根行波单导线的方向函数为：

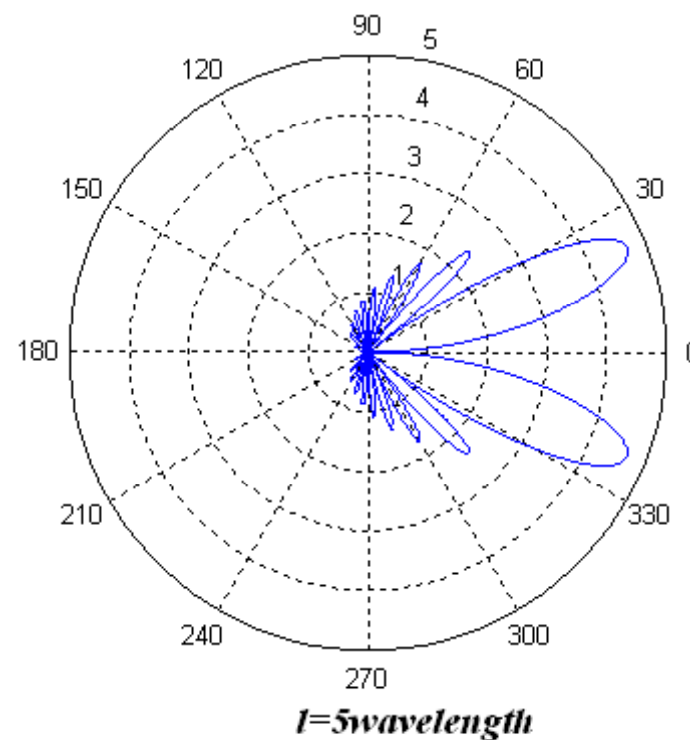
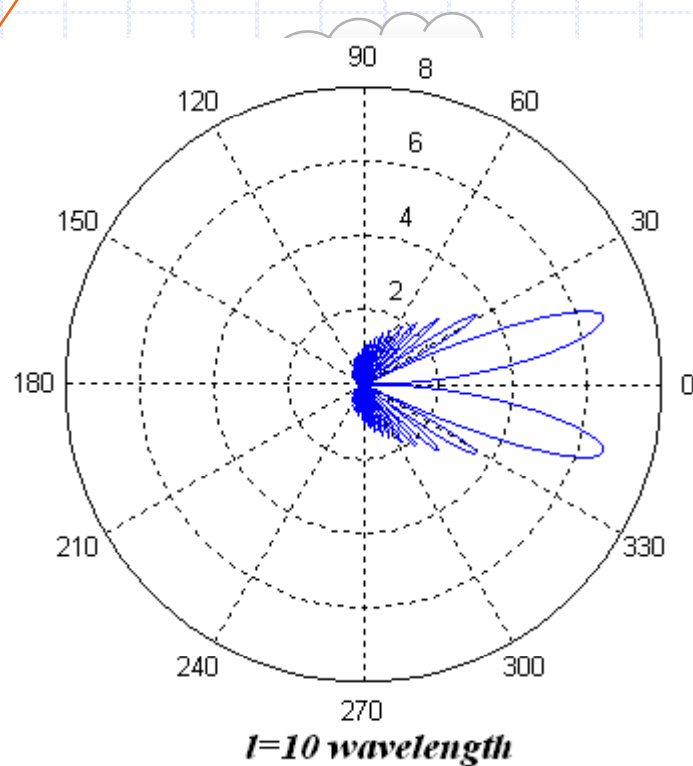
$$F(\theta) = \frac{\sin \theta \sin \left[\frac{\beta l}{2} (1 - \cos \theta) \right]}{1 - \cos \theta}$$

《天线理论与技术》

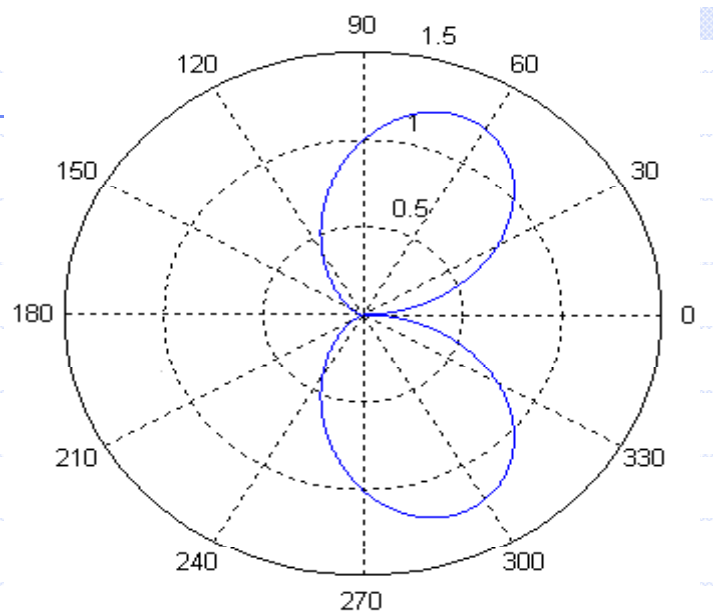




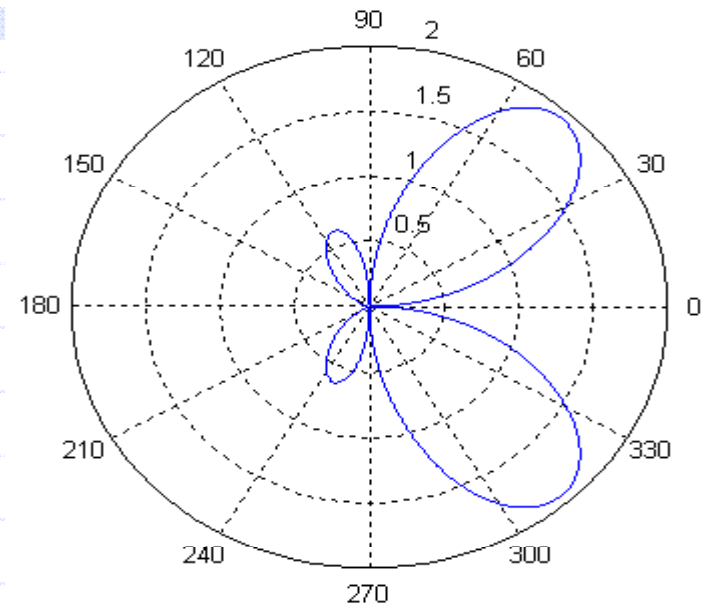
行波天线
如图放置



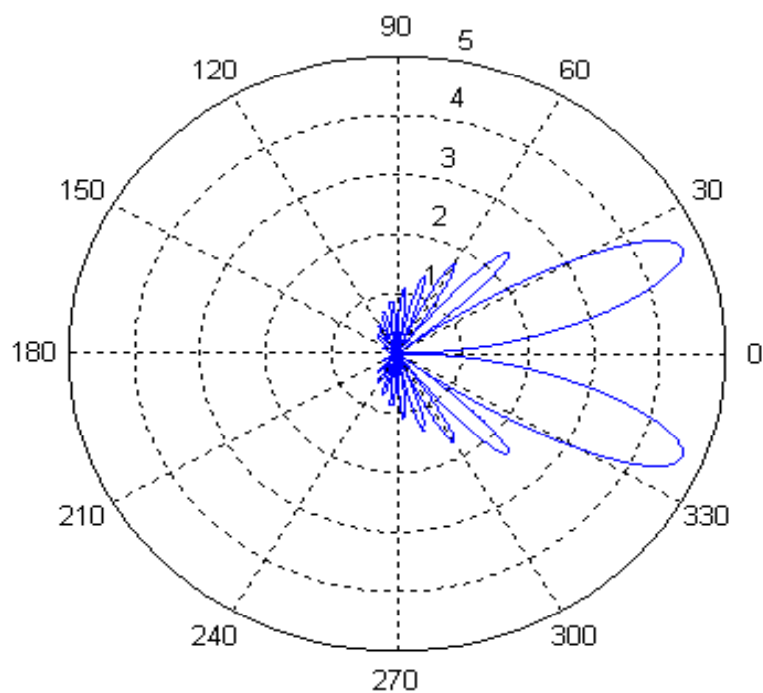
结论：行波天线是单方向辐射的，但其最大辐射方向随电长度的变化而变化，旁瓣电平较高且瓣数较多，与其它类型天线相比，相对其电尺寸而言增益是不高的。但这些不足可以利用排阵的方法得到一定程度的改善。



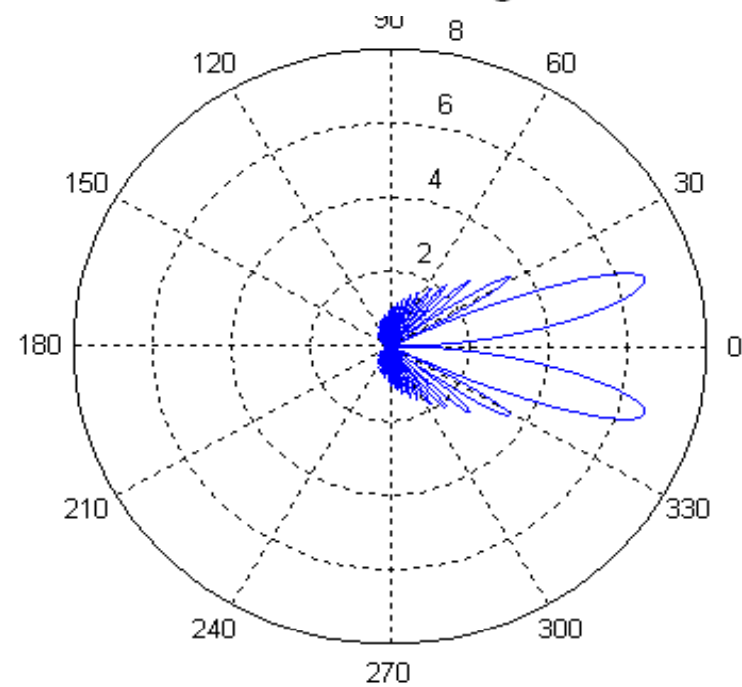
$l=0.5$ wavelength



$l=1.0$ wavelength



$l=5$ wavelength



$l=10$ wavelength

当天线长度较长时，行波天线的最大辐射方向可近似由下式确定：

$$\sin\left[\frac{\beta l}{2}(1 - \cos\theta)\right] = 1$$

因此，有：

$$\cos\theta_m = 1 - \frac{\lambda}{2l}$$

由上式可见，当 l/λ 较大时，工作波长改变时，最大辐射方向 θ_m 变化不大。

方向图特点:

1. 沿导线轴线方向没有辐射, 因为基本振子没有辐射。
2. 导线长度加长, 最大辐射方向愈靠近轴线方向, 即 θ_m 下降, 同时主瓣愈窄, 副瓣愈大且副瓣数增多。
3. 当 L/λ 很大时, θ_{m1} 随 L/λ 变化很小, 这样, 其最大辐射方向随波长变化很小。

——具有宽频特性

最大辐射角

$$|E_\theta| = K \left| \sin \theta \frac{\sin \left[\frac{kL}{2} (1 - \cos \theta) \right]}{\frac{kL}{2} (1 - \cos \theta)} \right|$$

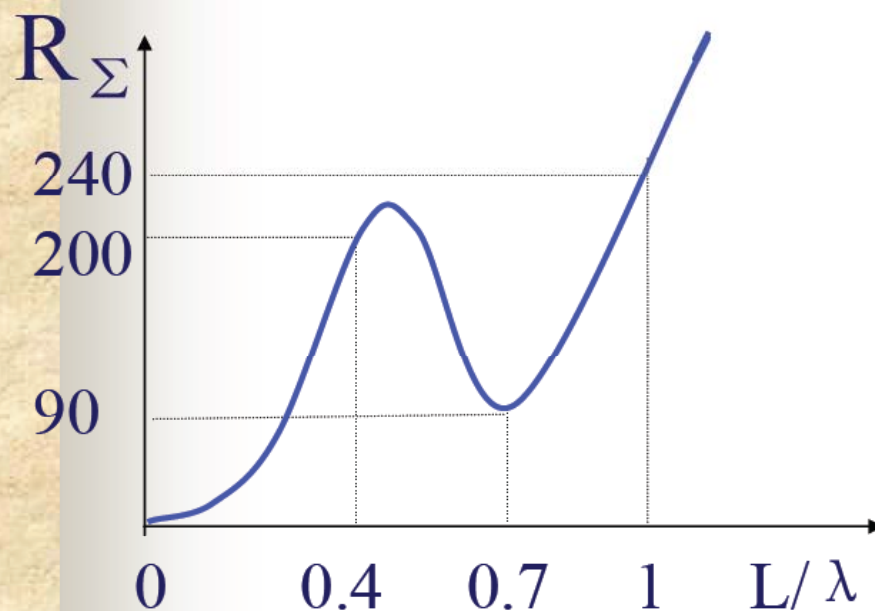
$L \gg \lambda$:

$$\left| \sin \left[\frac{kL}{2} (1 - \cos \theta_m) \right] \right| = 1, \quad \frac{kL}{2} (1 - \cos \theta_m) = \frac{\pi}{2}$$

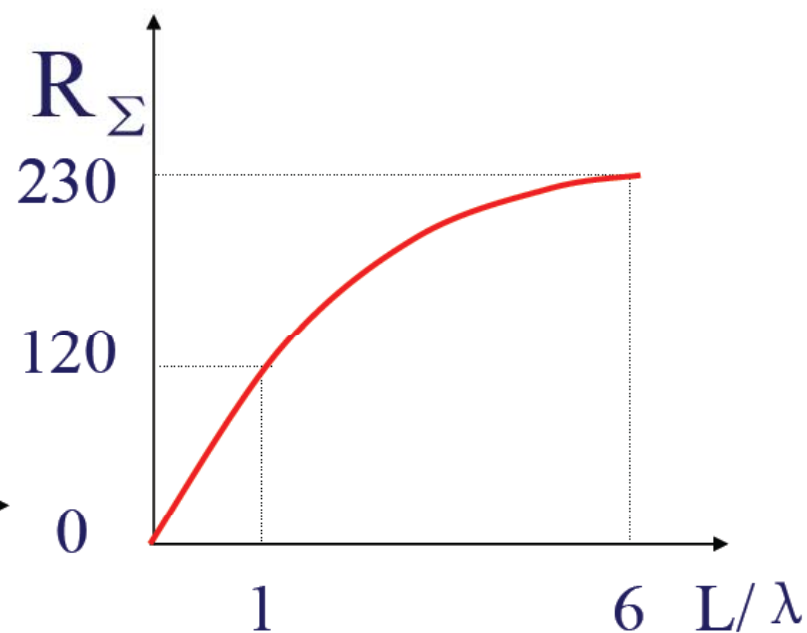
$$\theta_{M1} = \cos^{-1} \left(1 - \frac{\lambda}{2L} \right)$$

当天线辐射电阻: 可以利用坡印廷矢量在远区封闭球面积分求出。与驻波天线对称振子相比, 具有宽频带特性。如下图

输入阻抗基本上是一纯电阻，具有宽频带特性。



对称振子辐射电阻

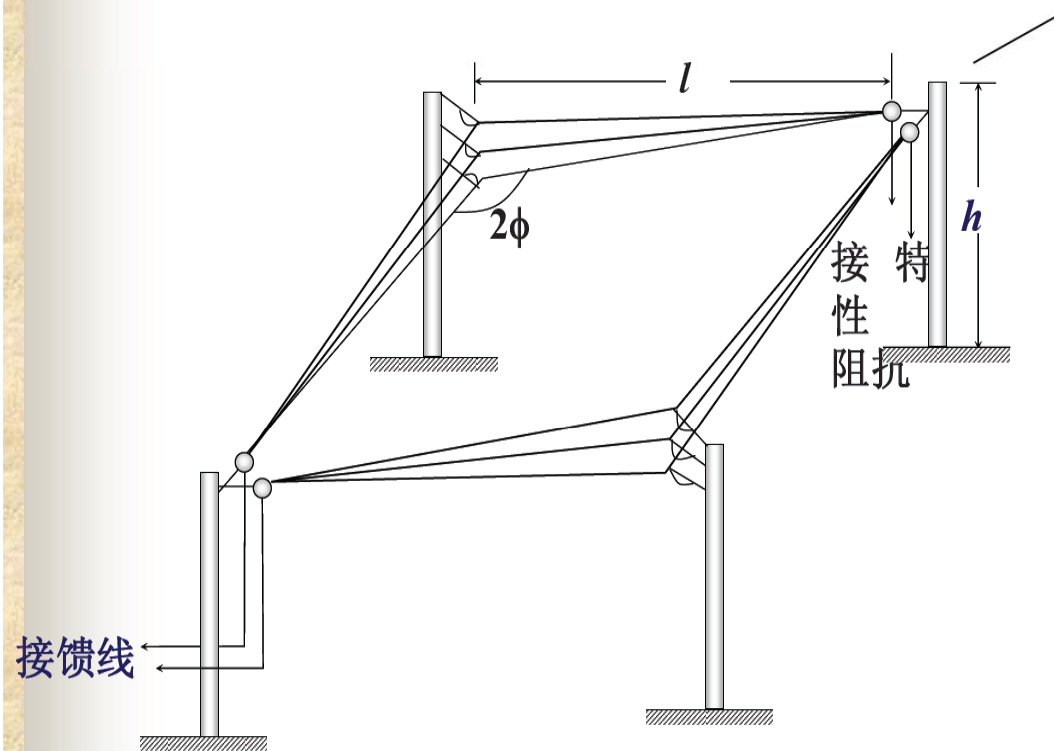


行波单导线辐射电阻

3.1.2 菱形天线（重点）

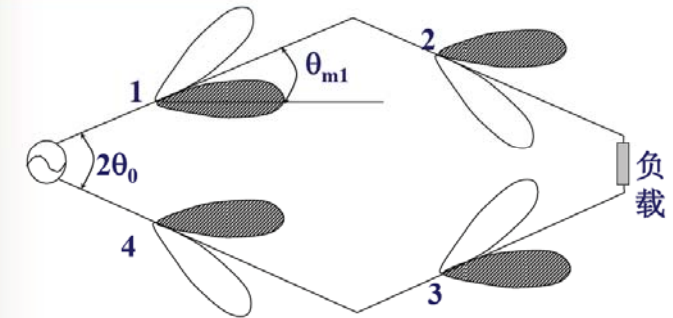
1. 菱形天线的构成
2. 电参数
3. 菱形天线的设计
4. 其它形式的菱形天线

1. 菱形天线的构成



$$|\theta_{m1} = \cos^{-1}\left(1 - \frac{\lambda}{2L}\right)|$$

菱形天线的辐射



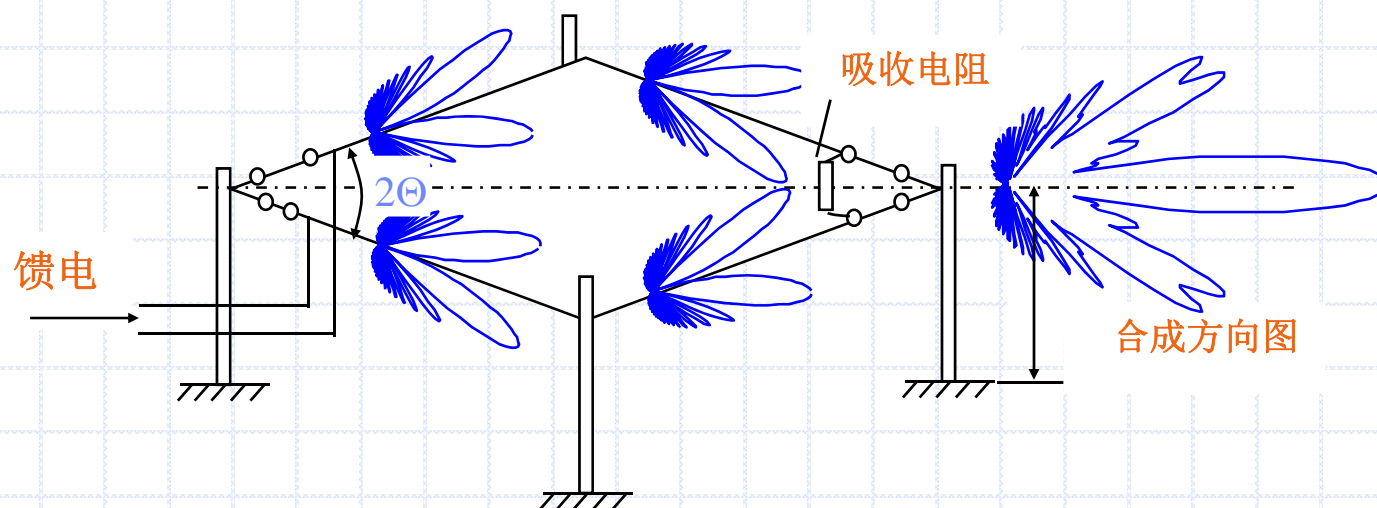
辐射场之间的相位差：

- 1. 电流的初始相位差；
- 2. 极化对应的相位差；
- 3. 路程差

用4根行波单导线构成菱形天线：

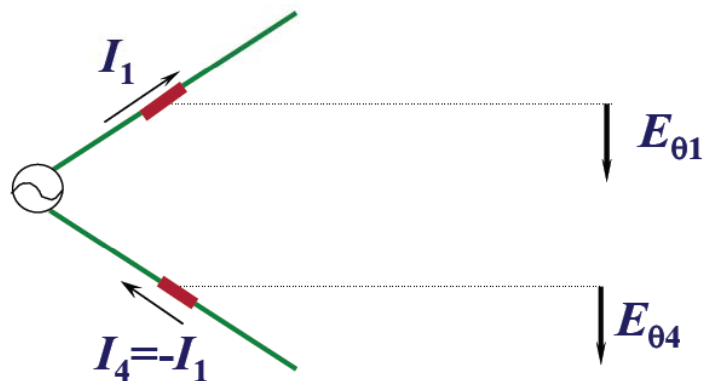
水平悬挂在四根支柱上，从菱形天线一个锐角端馈电，另一锐角端接匹配负载形成行波电流。菱形天线相当于匹配传输线从中间拉开，两线间距大于波长，因而产生辐射。

另一种被广泛应用于短波通信和广播、超短波散射通信的行波天线是由四根行波单导线连接成**菱形**的天线, 它可以看成是由两个V形天线在开口端相连而成, 其工作原理与V形天线相似。载有行波电流的四个臂长相等, 它们的辐射方向图完全相同。适当选择菱形的边长和顶角, 可在对角线方向获得最大辐射。



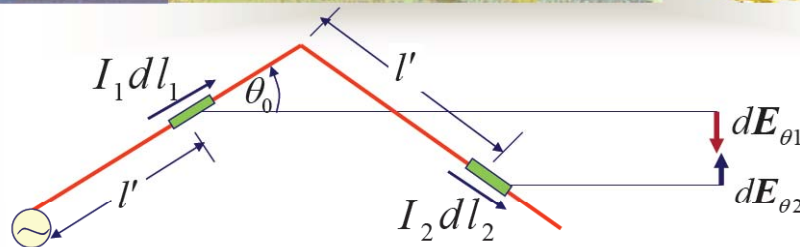
菱形天线及其平面方向图

1+4 (仅分析长对角线方向):



1. 电流方向相反;
2. 路程差为0

1+2 (仅分析长对角线方向):



1. 电流相位差 $\Delta\varphi_1 = -kL$

2. 电场方向相反产生相位差 π ;

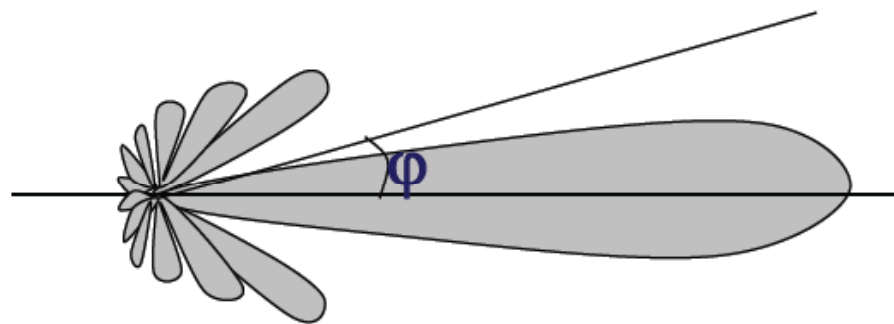
3. 路程产生的相位差 $\Delta\varphi_3 = kL \cos\theta_0$

$$\Delta\varphi = -kL + \pi + kL \cos\theta_0 \Big|_{\theta_0=\theta_M} = \pi - kl + kL \left(1 - \frac{\lambda}{2L}\right) = 0$$

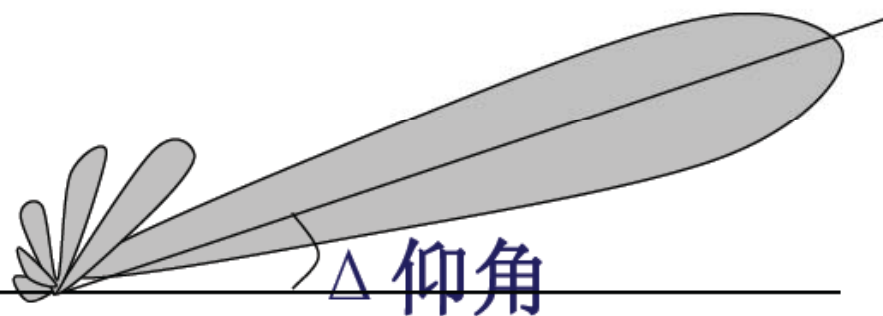
2. 电参数

(1) 方向性

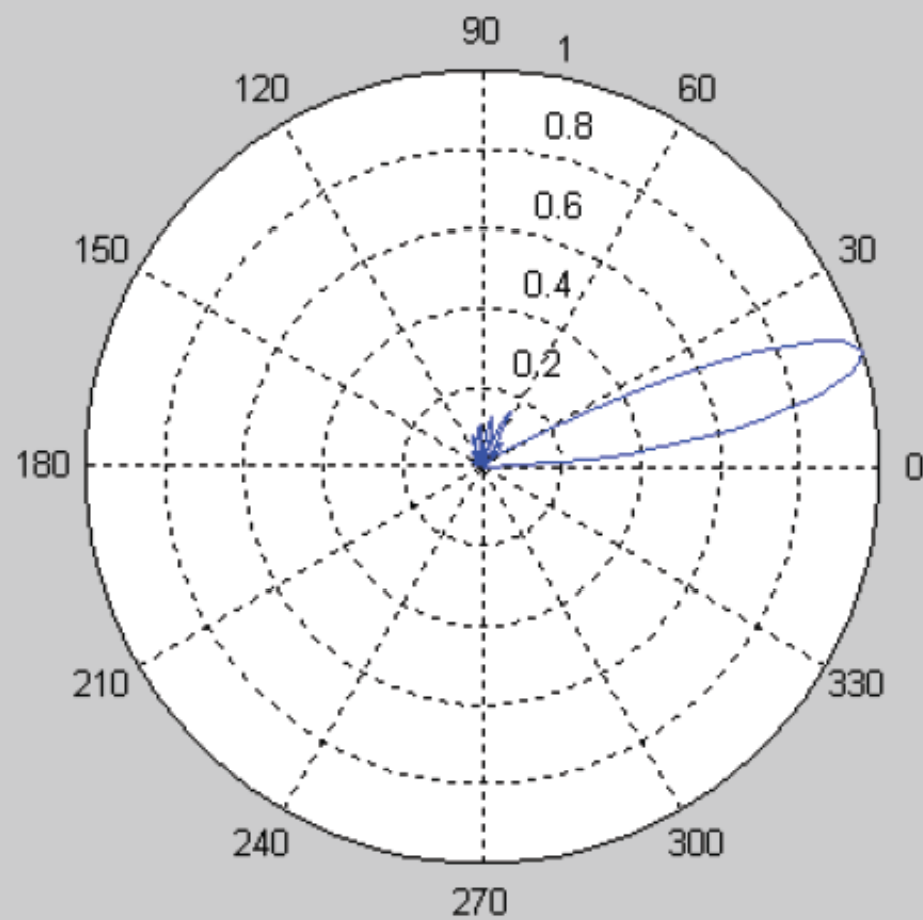
水平面方向图



垂直平面方向图



过长轴的垂直平面方向图



$$\Delta = 20^{\circ}$$

(2) 辐射电阻和输入阻抗

$$R_r \approx 4R_{11}$$

菱形天线的平均特性阻抗

$$Z_{0A} = 120 \left(\ln \frac{2L}{a} - 1 \right) + 120 \ln \cos \phi_0$$

$$Z_{in} = 120 \left[\ln \left(\frac{\lambda}{2\pi a} \right) + \ln \cos \phi_0 - 0.6 \right] - j170 \Omega$$

(3) 方向系数

$$\because R_r \approx 4R_{11}$$

$$f_{\max} = 4f_1$$

$$D = \frac{120 f_{\max}^2}{R_r}$$

是行波单导线的方向系数的4倍

(4) 效率: 50% ~ 80%

3. 菱形天线的设计

尺寸的选择

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{\varphi}}{\partial H} &= 0 \\ \frac{\partial f_{\varphi}}{\partial l} &= 0 \\ \frac{\partial f_{\varphi}}{\partial \phi_0} &= 0 \end{aligned}$$

$$H = \frac{\lambda}{4 \sin \Delta_0}$$

$$\frac{l}{\lambda} = \frac{1}{2(1 - \sin \phi_0 \cos \Delta_0)}$$

$$\phi_0 = 90^\circ - \Delta_0$$

菱形天线的优点:

- (1) 菱形天线可以在2:1或3:1频率范围内使用, 频带宽。
- (2) 结构简单, 架设经济, 维护方便。
- (3) 方向性较强, 适合于短波远距离定点通信。
- (4) 天线上驻波成分很小, 因此不会发生电压或电流过大的问题, 可应用于较大的功率。

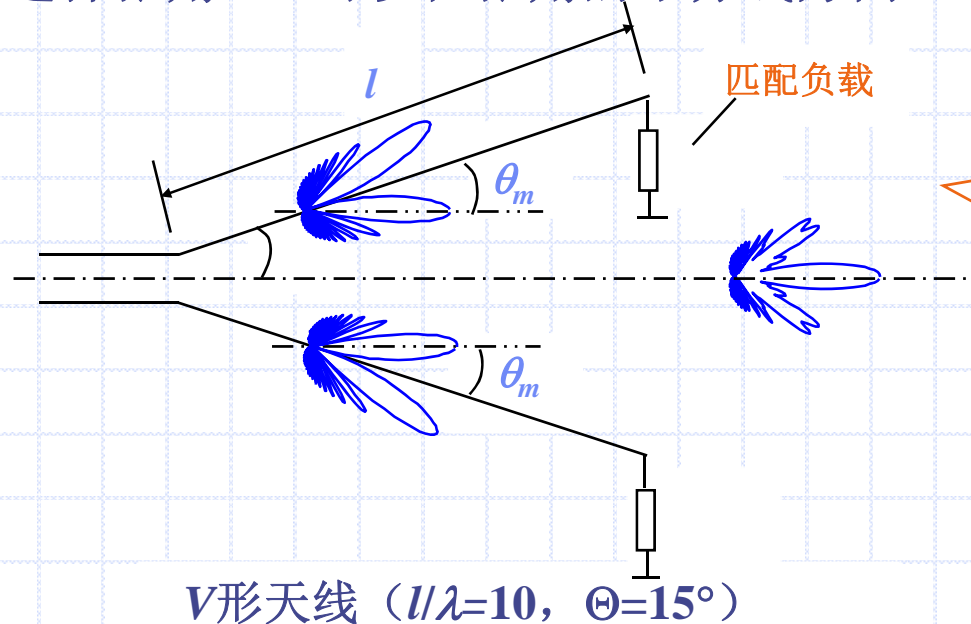
缺点:

- (1) 结构庞大, 场地大。适用于大型固定电台作远距离通信用。
- (2) 副瓣多, 副瓣电平较高。
- (3) 由于终端有负载电阻吸收能量, 故天线效率为50-80%左右。

2. V形天线

(Vee antenna and rhombic antenna)

用两根行波单导线可以组成V形天线。对于一定长度的行波单导线，适当选择张角 Θ ，可以在张角的平分线方向上，获得最大辐射。



由于 l/λ 较大时，工作波长改变而最大辐射方向 θ_m 变化不大，因此V形天线具有较好的方向图宽频带特性和阻抗宽频带特性。

由于其结构及架设特别简单，特别适应于短波移动式基站中。

第四章 宽频带天线

按工程上的习惯用法，若天线的阻抗、方向图等电特性在一倍频程($f_{\max}/f_{\min}=2$)或几倍频程范围内无明显变化，就可称为**宽频带天线**，若天线能在更大频程范围内(比如 $f_{\max}/f_{\min}\geq 10$)工作，而其阻抗、方向图等电特性基本上不变化时，就称为**非频变天线(frequency independent antenna)**。

驻波天线的方向图和阻抗对天线电尺寸的变化十分敏感。若能设计一种天线，当工作频率变化时，天线的尺寸也随之变化，即**保持电尺寸不变**，则天线能在很宽频带范围内保持相同的辐射特性，这就是非频变特性。事实上，天线只要满足以下两个条件，就可以实现非频变特性。

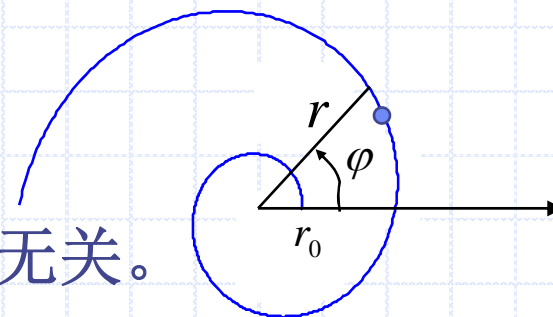
1. 非频变天线的条件

- 角度条件
- 终端效应弱

(1) 角度条件

天线的形状仅取决于角度，而与其它尺寸无关。
即：

$$r = r_0 e^{a\varphi} \quad (1)$$



换句话说，当工作频率变化时，天线的形状、尺寸与波长之间的相对关系不变，如图所示。

(2) 终端效应弱

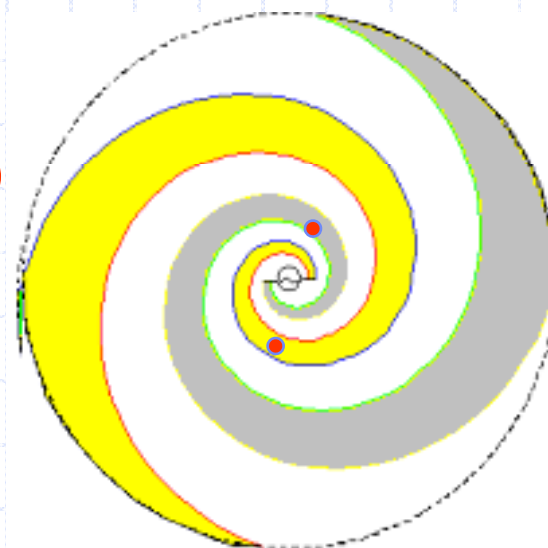
如果天线上电流衰减很快，则决定天线辐射特性的主要是载有较大电流的那部分，而其余部分作用较小，若将其截去，对天线的电性能影响不大，这样有限长天线就具有近似无限长天线的电性能，这种现象就称为终端效应弱。终端效应强弱取决于天线的结构。

非频变天线分为两大类：**等角螺旋天线**和**对数周期天线**

2. 平面等角螺旋天线

(planar equiangular spiral antenna)

在螺旋天线的始端由电压激励激起电流并沿两臂传输。当电流传输到两臂之间近似等于半波长区域时，便在此发生谐振，并产生很强的辐射，而在此区域之外，电流和场很快衰减。



当增加或降低工作频率时，天线上有效辐射区沿螺旋线向里或向外移动，但有效辐射区的电尺寸不变，使得方向图和阻抗特性与频率几乎无关。实验证明：臂上电流在流过约一个波长后迅速衰减到20dB以下，因此其有效辐射区就是周长约为一个波长以内的部分。

平面等角螺旋天线的辐射场是圆极化的，且双向辐射即在天线平面的两侧各有一个主波束，如果将平面的双臂等角螺旋天线绕制在一个旋转的圆锥面上，则可以实现锥顶方向的单向辐射，且方向图仍然保持宽频带和圆极化特性。平面和圆锥等角螺旋天线的频率范围可以达到20倍频程或者更大。

式(1)又可写为如下形式：

$$\varphi = \frac{1}{a} \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) \quad (2)$$

因此等角螺旋天线又称为对数螺旋天线。下面我们讨论非频变天线的另一类：对数周期天线。

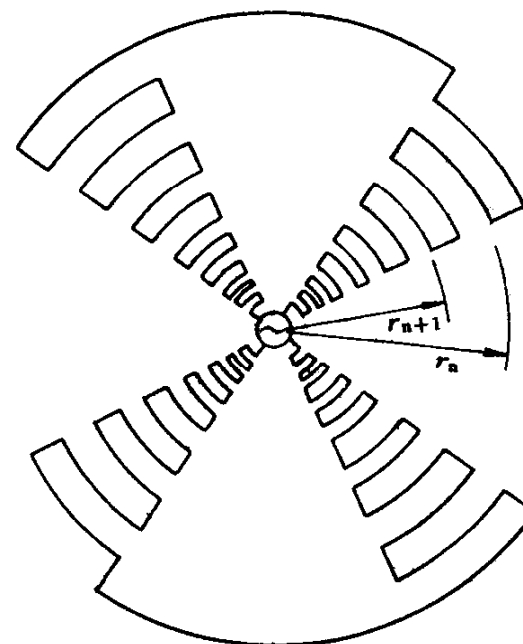
3. 对数周期天线(Log-periodic antenna)

(1) 齿状对数周期天线

对数周期天线的基本结构是将金属板刻成齿状，如图所示，齿是不连续的，其长度是由原点发出的两根直线之间的夹角所决定，相邻两个齿的间隔是按照等角螺旋天线设计中相邻导体之间的距离设计的，即：

$$\frac{r_{n+1}}{r_n} = \frac{r_0 e^{a(\varphi-\delta)}}{r_0 e^{a(\varphi+2\pi-\delta)}} = e^{-2\pi a} = \tau$$

其中， τ 为小于1的常数



对于无限长的结构，当天线的工作频率变化 τ 倍，即频率从 f 变到 $\tau f, \tau^2 f, \tau^3 f, \dots$ 时，天线的电结构完全相同，因此在这些离散的频率点上具有相同的电特性，但在 $f \sim \tau f$ 、 $\tau f \sim \tau^2 f$ 等频率间隔内，天线的电性能是有些变化，但只要这种变化不超过一定的指标，就可认为天线上基本上具有非频变特性。由于天线性能在很宽的频带范围内以 $\ln(1/\tau)$ 为周期重复变化，所以称为对数周期天线。

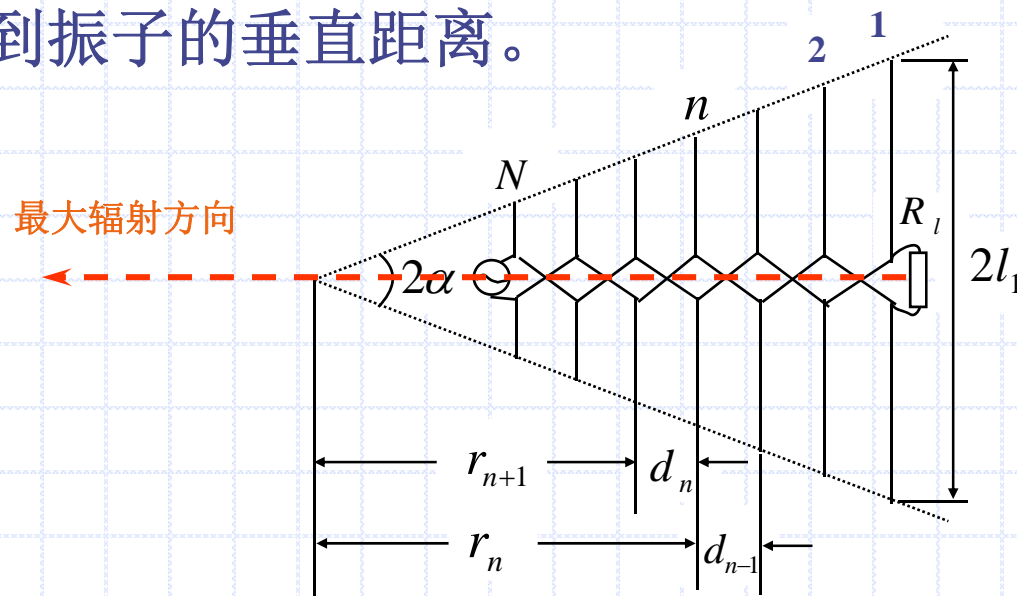
实际上，天线不可能无限长，而齿的主要作用是阻碍径向电流。实验证明：齿片上的横向电流远大于径向电流，如果齿长恰等于谐振长度(即齿的一臂约等于 $\lambda/4$)时，该齿具有最大的横向电流，且附近的几个齿上也具有一定幅度的横向电流，而那些齿长远大于谐振长度的各齿，其电流迅速衰减到最大值以下，这说明天线的终端效应很弱，因此有限长的天线近似具有无限长天线的特性。

(2) 对数周期偶极子天线

对数周期偶极子天线是由N个平行振子天线的结构依据下列关系设计的：

$$\frac{l_{n+1}}{l_n} = \frac{r_{n+1}}{r_n} = \frac{d_{n+1}}{d_n} = \tau$$

其中， l 表示振子的长度； d 表示相邻振子的间距； r 表示由顶点到振子的垂直距离。



天线的几何结构主要取决于参数 τ 、 α 和 σ ，它们之间满足下列关系：

$$\tan \alpha = \frac{l_n}{r_n} \qquad \sigma = \frac{d_n}{4l_n} = \frac{1-\tau}{4 \tan \alpha}$$

N个对称振子天线用双线传输线馈电，且两相邻振子交叉连接。当天线馈电后，能量沿双绞线传输，当能量行至长度接近于半波长的振子时，由于发生谐振，输入阻抗呈现纯电阻，所以振子上电流大，形成较强的辐射场，我们把这部分称为**有效辐射区**，有效区以外的振子，由于离谐振长度较远，输入阻抗很大，因而其上电流很小，它们对辐射场的贡献可以忽略。当天线工作频率变化时，有效辐射区随频率的变化而左右移动，但电尺寸不变，因而对数周期天线具有宽频带特性，其频带范围为**10**或者是**15**倍频程。对数周期天线在超短波和短波波段获得了广泛应用。

对数周期天线是端射型的、线极化天线，其最大辐射方向是沿连接各振子中心的轴线指向短振子方向，电场的极化方向平行于振子方向。