

# 第 4 章 地面对天线电气特性的影响

## § 4-1 地面电流的作用与镜像原理

## § 4-2 理想导电地面上的对称振子

## § 4-3 理想导电地面上的垂直接地天线

# 第 4 章 地面对天线电气特性的影响

## § 4-1 地面电流的作用与镜像原理

一、地面电流的作用

二、镜像原理

# 一、地面电流的作用

在前面三章中都是假设天线处于自由空间。事实上，除人造卫星上的天线以外，任何天线都设置在地面上。

实际大地是半导电媒质。在天线所产生的电磁场作用下，大地上会产生感应电流。大地的电流由两部分构成：

1、传导电流，由微分形式的欧姆定律来确定

$$J_C = \sigma E$$

2、位移电流，即电位移矢量对时间的变化率

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = j\omega D = j\omega \epsilon E$$

地面上方任何观察点处的电磁场，是天线辐射的电磁波与大地辐射的电磁波相互叠加的结果。

导电媒质对天线的影响由其电气特性决定。

$$\text{良导体} \quad \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \gg 1 \quad \text{不良导体} \quad \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \ll 1$$

大地的电气特性与电磁波的工作频率有十分密切的关系。

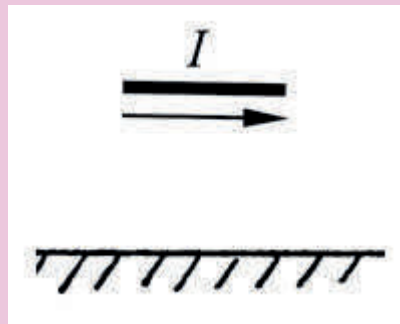
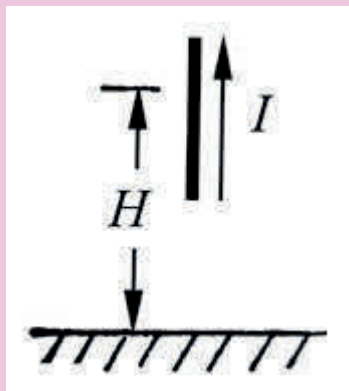
在长波和中波波段，由于工作波长较长，一般情况下都能满足式良导体条件，因此呈现良导体特征的地面，将对天线的电气特性产生较大的影响。

在超短波和微波波段，由于工作波长较短，大地呈现不良导体的特征，可以忽略大地对天线的电气特性影响，仅在分析无线电波传播的时候才考虑到大地的作用。

本章讨论频率较低时，地面呈现良导体特征的情况，此时把大地表面近似看成是无限大的理想导体平面，简称理想地面。

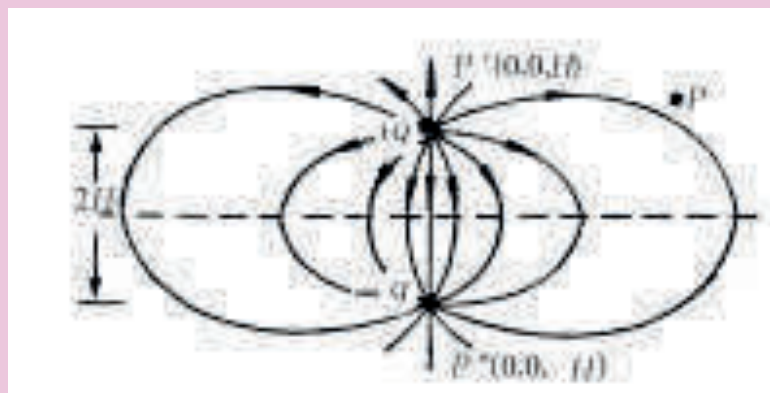
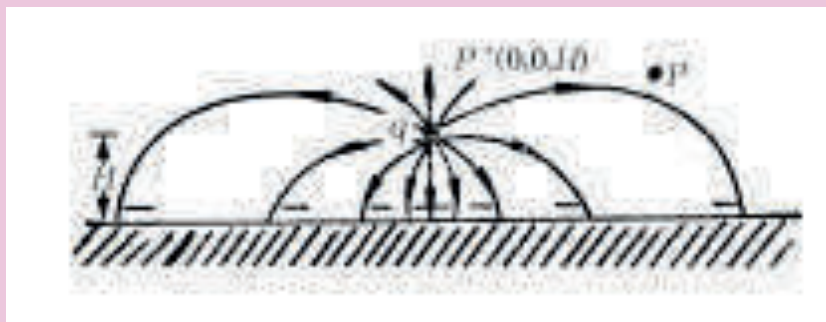
通过**麦克斯韦方程**和电磁场的边界条件，可以直接分析无限理想大导体平面上方的电荷、电流引起的电磁场，但这样做是非常麻烦的。

根据电磁场理论的惟一性原理可以得到**镜像原理**，通过镜像原理来分析无限大理想导体平面上方的电荷、电流引起的电磁场，要比直接通过麦克斯韦方程来分析简单得多。



## 二、镜像原理

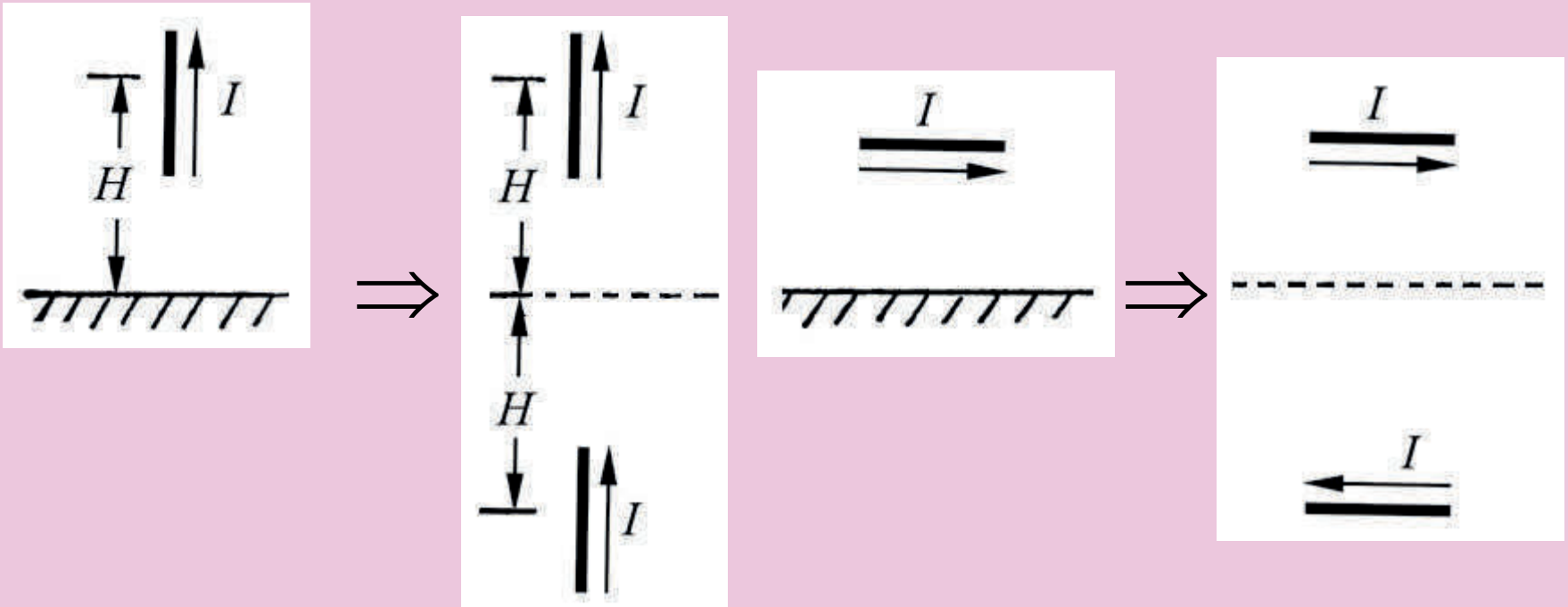
### 1. 点电荷的镜像



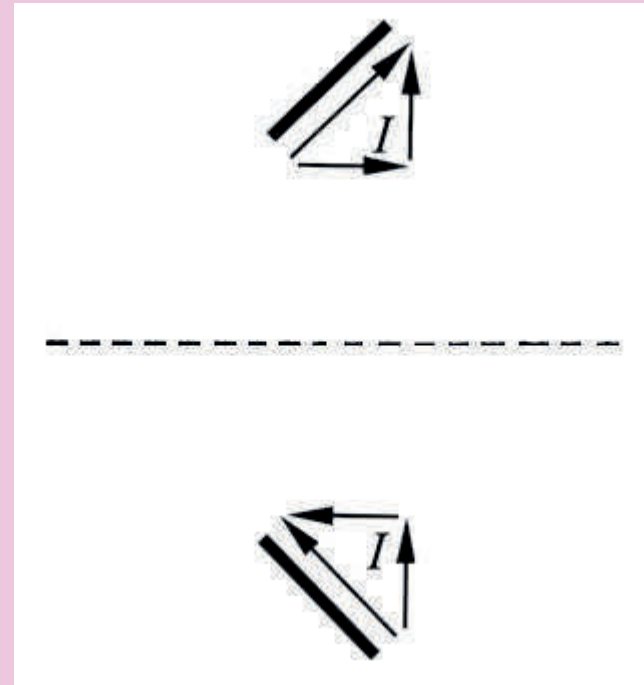
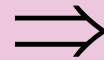
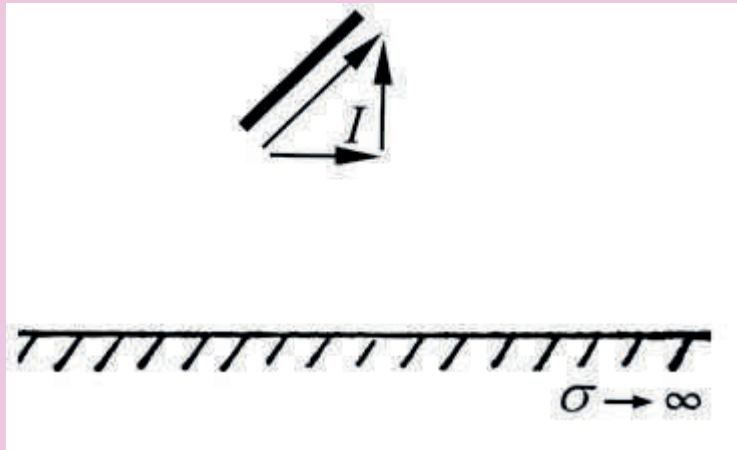
## 2. 电流元的镜像

垂直于理想导体平面的电流元，沿垂直方向看，其镜像电流方向与电流元本身电流方向一致，故称为**正像**。

平行于理想导体平面的电流元，其镜像电流方向与电流元本身电流方向相反，故称为**负像**。



## 2. 电流元的镜像





# 第 4 章 地面对天线电气特性的影响

## § 4-2 理想导电地面上的对称振子

- 一、垂直对称振子的辐射场及其方向性
- 二、方向特性与阻抗特性的定量分析
- 三、理想导电地面上对称振子的阻抗特性

# 一、垂直对称振子的辐射场及其方向性

垂直对称振子和它的镜像一起构成了共轴线排列、间距为  $d = 2H$  的等幅同相二元天线阵。

电磁波射线与  $z$  轴的夹角为  $\theta$ ，而与地面的夹角

$$\Delta = 90^\circ - \theta$$

称为**仰角**。

垂直对称振子本身的辐射场可以改写为

$$E_1 = j \frac{60I_M}{r} f_1(\Delta) e^{-j\beta r} = j \frac{60I_M}{r} \frac{\cos(\beta l \sin \Delta) - \cos(\beta l)}{\cos \Delta} e^{-j\beta r}$$

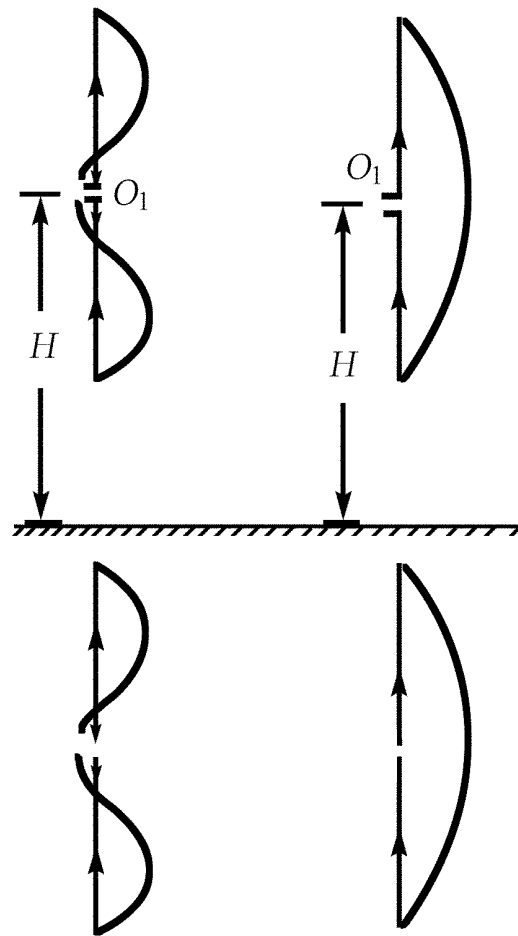


图 4-2-1 垂直对称振子

$$E_1 = j \frac{60I_M}{r} f_1(\Delta) e^{-j\beta r} = j \frac{60I_M}{r} \frac{\cos(\beta l \sin \Delta) - \cos(\beta l)}{\cos \Delta} e^{-j\beta r}$$

垂直对称振子与其镜像辐射场

之间的相位差表达式应改写为

$$\psi = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta = \frac{4\pi H}{\lambda} \sin \Delta$$

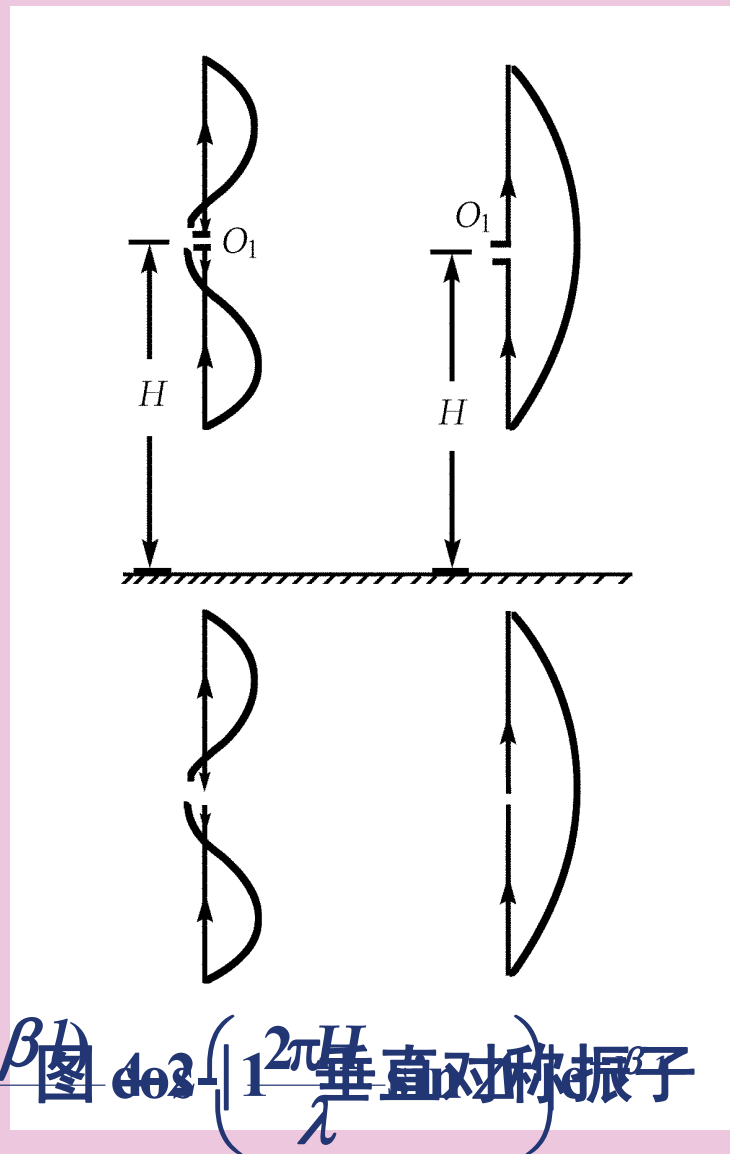
这个同相二元天线阵的阵因子

$$f_a(\Delta) = 2 \cos \frac{\psi}{2} = 2 \cos \left( \frac{2\pi H}{\lambda} \sin \Delta \right)$$

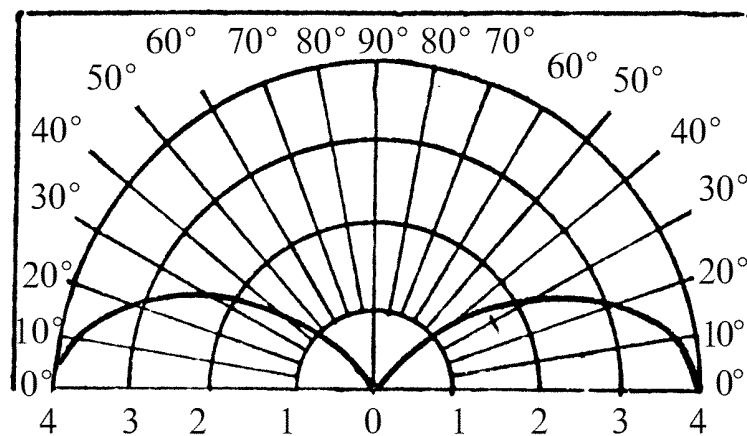
由于这个因子是由地面电流所引起的，因而称之为地面因子。

这样，无限大理想导电地面上方垂直对称振子辐射场为

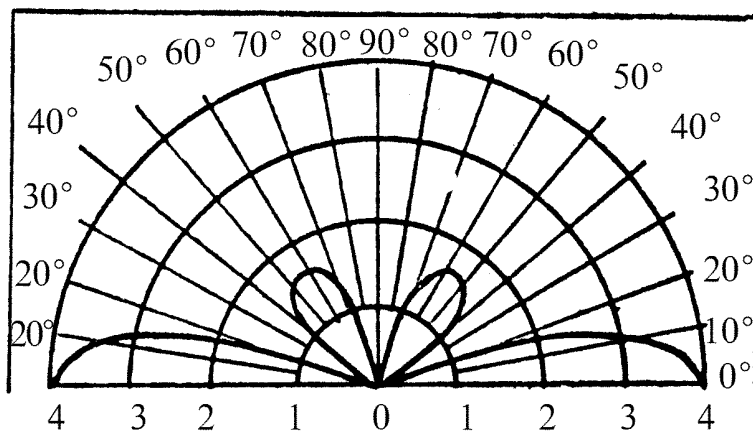
$$E = E_1 f_a(\Delta) = j \frac{120I_M}{r} \frac{\cos(\beta l \sin \Delta) - \cos(\beta l)}{\cos \Delta} \cos \left( \frac{2\pi H}{\lambda} \sin \Delta \right)$$



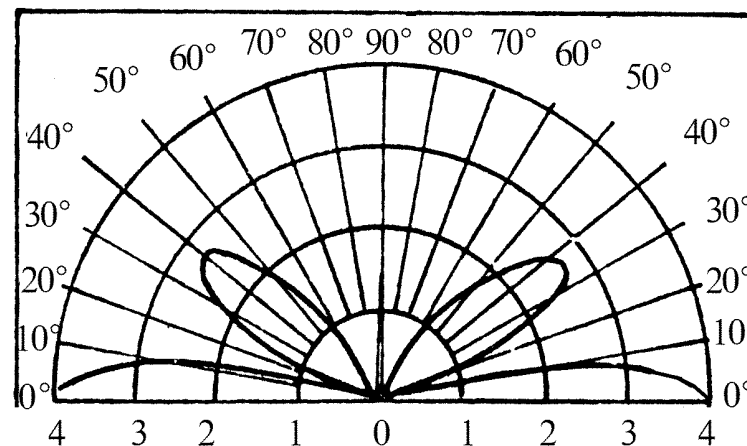
理想导电地面上方不同高度的垂直半波对称振子在垂直面内的方向性图。 **最大辐射方向始终沿地表面。**



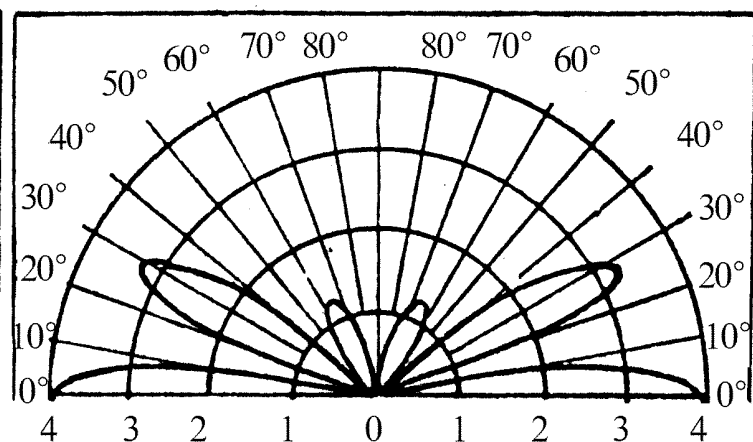
(a)  $H = \frac{\lambda}{4}$



(b)  $H = \frac{\lambda}{2}$



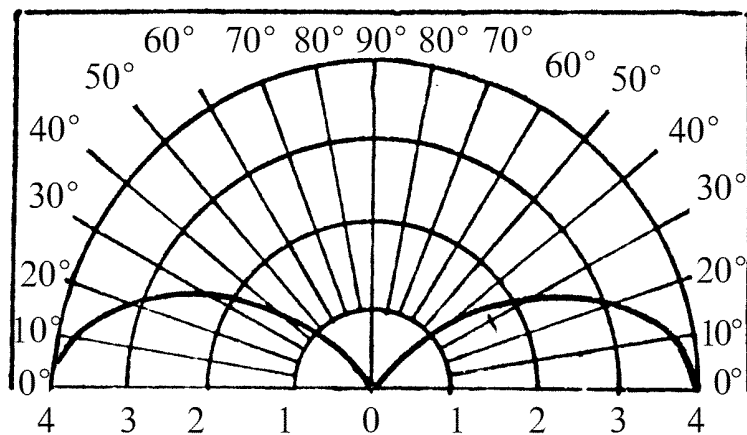
(c)  $H = \frac{3\lambda}{4}$



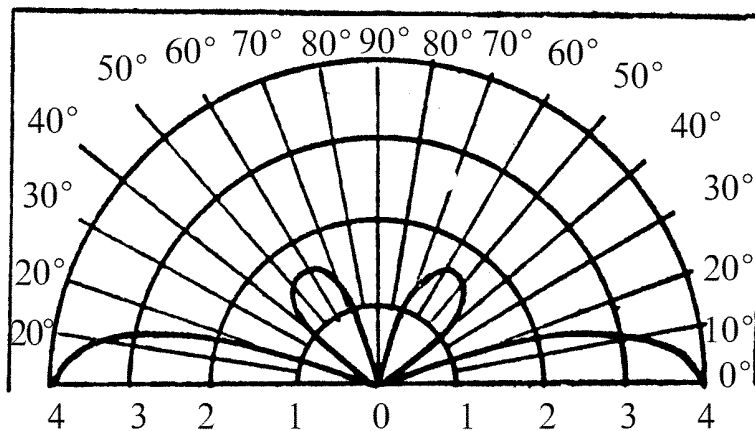
(d)  $H = \lambda$

**图 4-2-2 垂直半波对称振子及其垂直面内的方向性图**

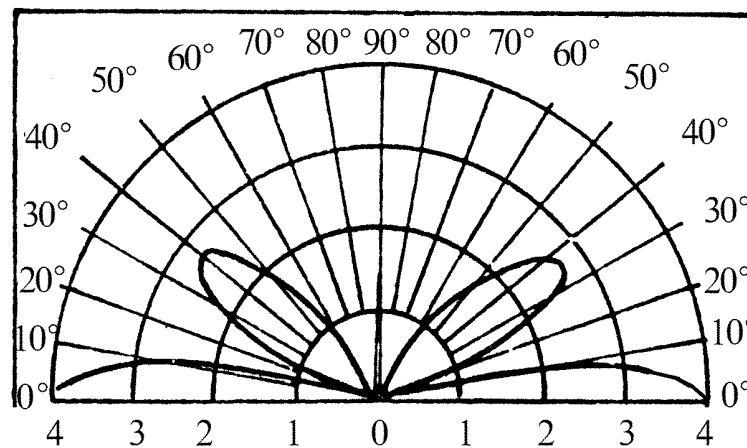
因为理想导体    电磁场为零，所以垂直半波对称振子的方向性图，仅是自由空间同相二元阵方向性图的一半。



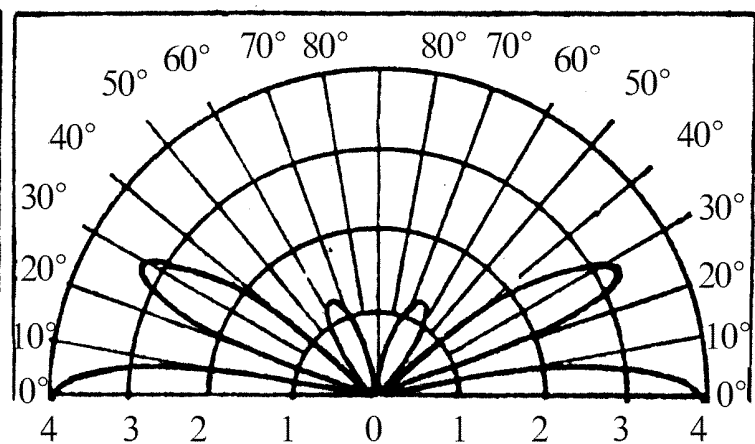
(a)  $H = \frac{\lambda}{4}$



(b)  $H = \frac{\lambda}{2}$



(c)  $H = \frac{3\lambda}{4}$

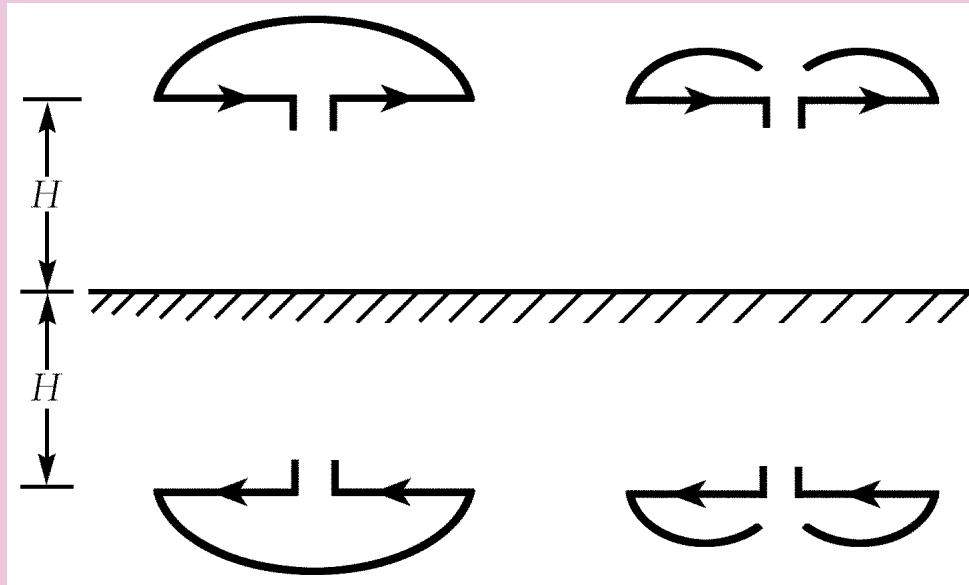


(d)  $H = \lambda$

**图 4-2-2 垂直半波对称振子及其垂直面内的方向性图**

## 二、水平对称振子的辐射场及其方向性

### 1. 水平对称振子的辐射场



水平对称振子和它的镜像一起构成了齐平排列、间距  $d = 2H$  的等幅反相二元天线阵。

电磁波射线与  $y$  轴的方向余弦为

$$\cos \alpha_y = \sin \theta \sin \varphi = \cos \Delta \sin \varphi$$

水平对称振子本身的辐射场为

$$\begin{aligned} E_1 &= j \frac{60 I_M}{r} f_1(\Delta, \varphi) e^{-j\beta r} \\ &= j \frac{60 I_M}{r} \frac{\cos(\beta l \cos \Delta \sin \varphi) - \cos(\beta l)}{\sqrt{1 - \cos^2 \Delta \sin^2 \varphi}} e^{-j\beta r} \end{aligned}$$

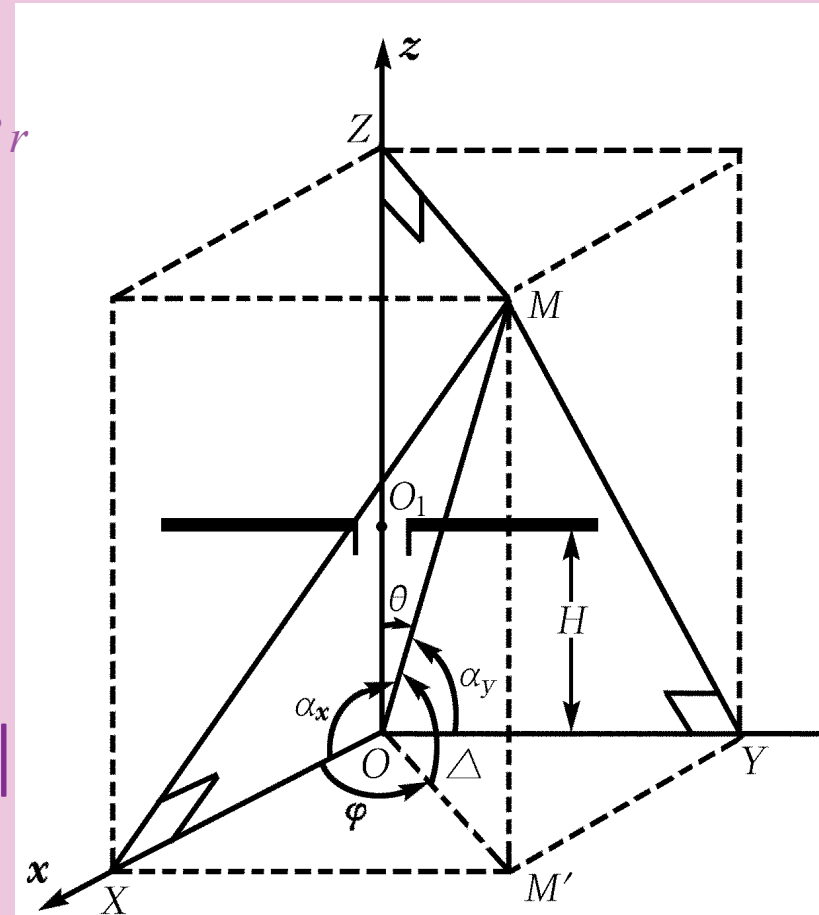
反相二元阵的辐射场相位差函数

$$\psi = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta + \alpha = \frac{4\pi H}{\lambda} \sin \Delta + \pi$$

水平对称振子的地面因子为

$$f_a(\Delta) = 2 \cos \frac{\psi}{2} = 2 \sin \left( \frac{2\pi H}{\lambda} \sin \Delta \right)$$

设半波对称振子的振子轴沿  $y$  轴。



$$E_1 = j \frac{60I_M}{r} f_1(\Delta, \varphi) e^{-j\beta r} = j \frac{60I_M}{r} \frac{\cos(\beta l \cos \Delta \sin \varphi) - \cos(\beta l)}{\sqrt{1 - \cos^2 \Delta \sin^2 \varphi}} e^{-j\beta r}$$

$$f_a(\Delta) = 2 \cos \frac{\psi}{2} = 2 \sin \left( \left| \frac{2\pi H}{\lambda} \sin \Delta \right| \right)$$

## 理想导电地面上方水平对称振子的辐射场

$$E = E_1 f_a(\Delta)$$

$$= j \frac{120I_M}{r} \frac{\cos(\beta l \cos \Delta \sin \varphi) - \cos(\beta l)}{\sqrt{1 - \cos^2 \Delta \sin^2 \varphi}} \sin \left( \frac{2\pi H}{\lambda} \sin \Delta \right) e^{-j\beta r}$$



$$E = E_1 f_a(\Delta) = j \frac{120 I_M}{r} \frac{\cos(\beta l \cos \Delta \sin \varphi) - \cos(\beta l)}{\sqrt{1 - \cos^2 \Delta \sin^2 \varphi}} \sin\left(\frac{2\pi H}{\lambda} \sin \Delta\right) e^{-j\beta r}$$

## 2. 水平对称振子赤道面和子午面的方向性

对于水平半波对称振子，其归一化方向性函数为

$$F_1(\Delta, \varphi) = \frac{\cos(\beta l \cos \Delta \sin \varphi) - \cos(\beta l)}{[1 - \cos(\beta l)] \sqrt{1 - \cos^2 \Delta \sin^2 \varphi}} = \frac{\cos(90^\circ \cos \Delta \sin \varphi)}{\sqrt{1 - \cos^2 \Delta \sin^2 \varphi}}$$

归一化地面因子

$$F_a(\Delta) = \sin\left(\frac{2\pi H}{\lambda} \sin \Delta\right)$$

理想导电地面上水平半波对称振子总归一化方向性函数

$$F(\Delta, \varphi) = F_1(\Delta, \varphi) F_a(\Delta) = \frac{\cos(90^\circ \cos \Delta \sin \varphi)}{\sqrt{1 - \cos^2 \Delta \sin^2 \varphi}} \sin\left(\frac{2\pi H}{\lambda} \sin \Delta\right)$$

$$F(\Delta, \varphi) = F_1(\Delta, \varphi)F_a(\Delta) = \frac{\cos(90^\circ \cos \Delta \sin \varphi)}{\sqrt{1 - \cos^2 \Delta \sin^2 \varphi}} \sin\left(\frac{2\pi H}{\lambda} \sin \Delta\right)$$

垂直的主平面  $zOx$  平面是水平半波对称振子及其镜像共同的赤道面，在该平面内  $\varphi = 0^\circ$ ，半波对称振子本身的方向性函数为

$$F_1(\Delta, \varphi)|_{\varphi=0^\circ} = F_1(\Delta) = 1$$

因此理想导电地面上水平对称振子赤道面内总的归一化方向性函数就等于阵因子，即

$$F(\Delta, \varphi)|_{\varphi=0^\circ} = F_a(\Delta) = \sin\left(\frac{2\pi H}{\lambda} \sin \Delta\right)$$

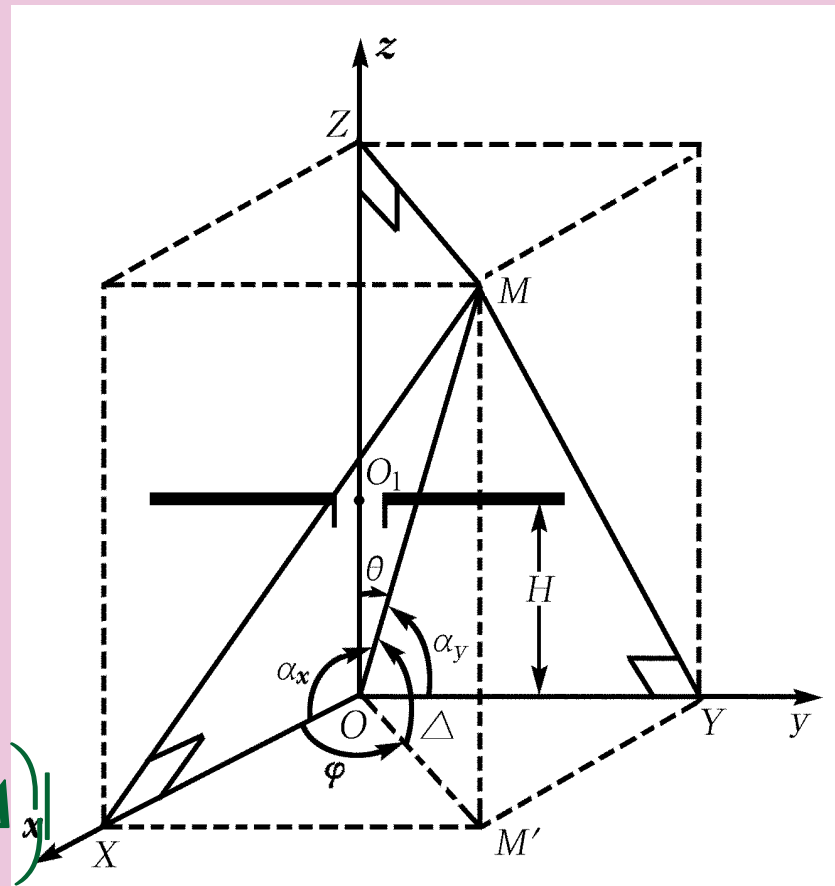
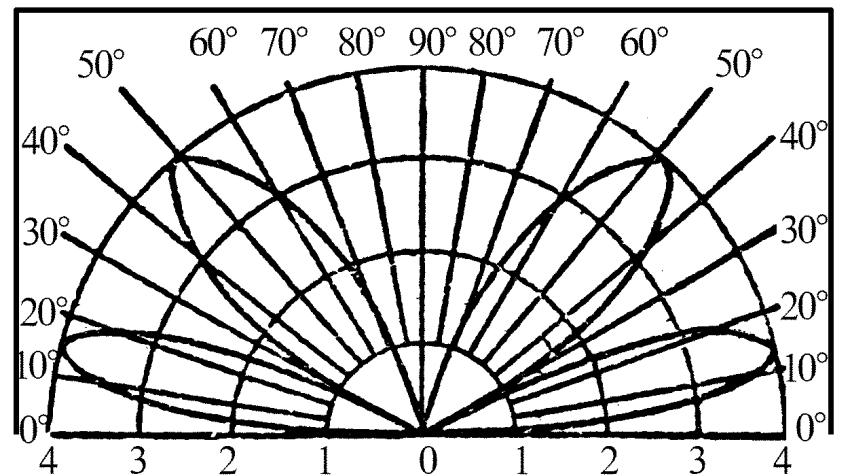
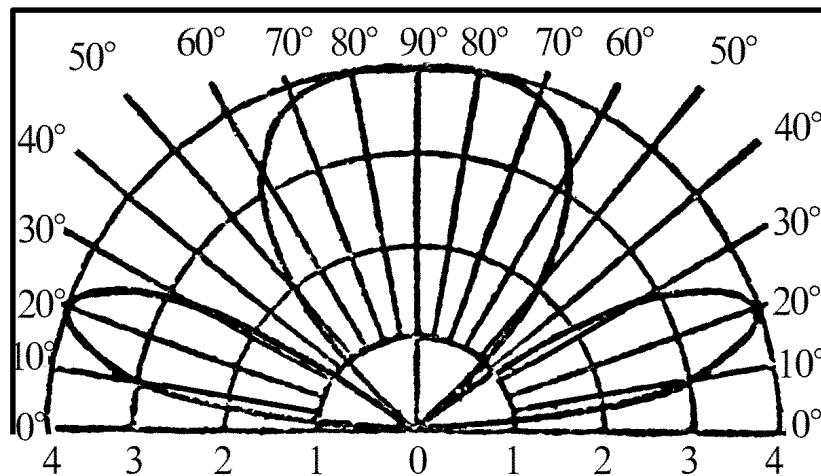
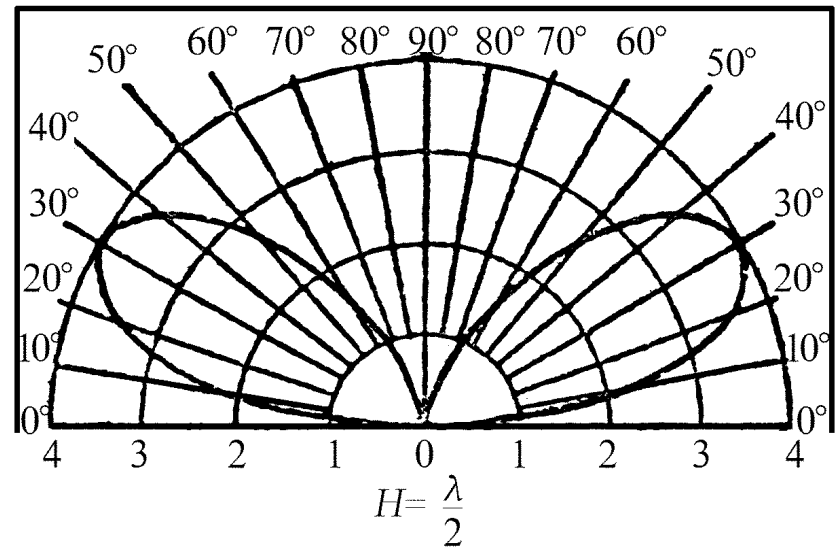
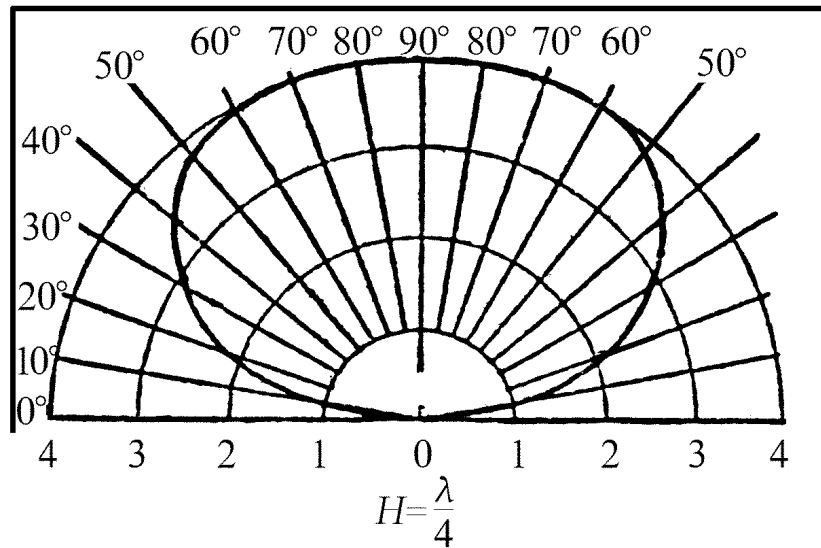


图 4-2-4 水平对称振子的坐标系

不同架设高度的水平半波振子赤道面的方向性图。

水平面的辐射总为零，天线最大辐射方向有一定仰角。



理想导体 电磁场为零，因此理想导电地面上方的方向性图仅是自由空间反相二元天线阵方向性图的一半。

垂直的主平面  $yOz$  平面是水平半波对称振子及其镜像共同的子午面，在该平面内  $\varphi = 90^\circ$ ，半波对称振子本身的方向性函数

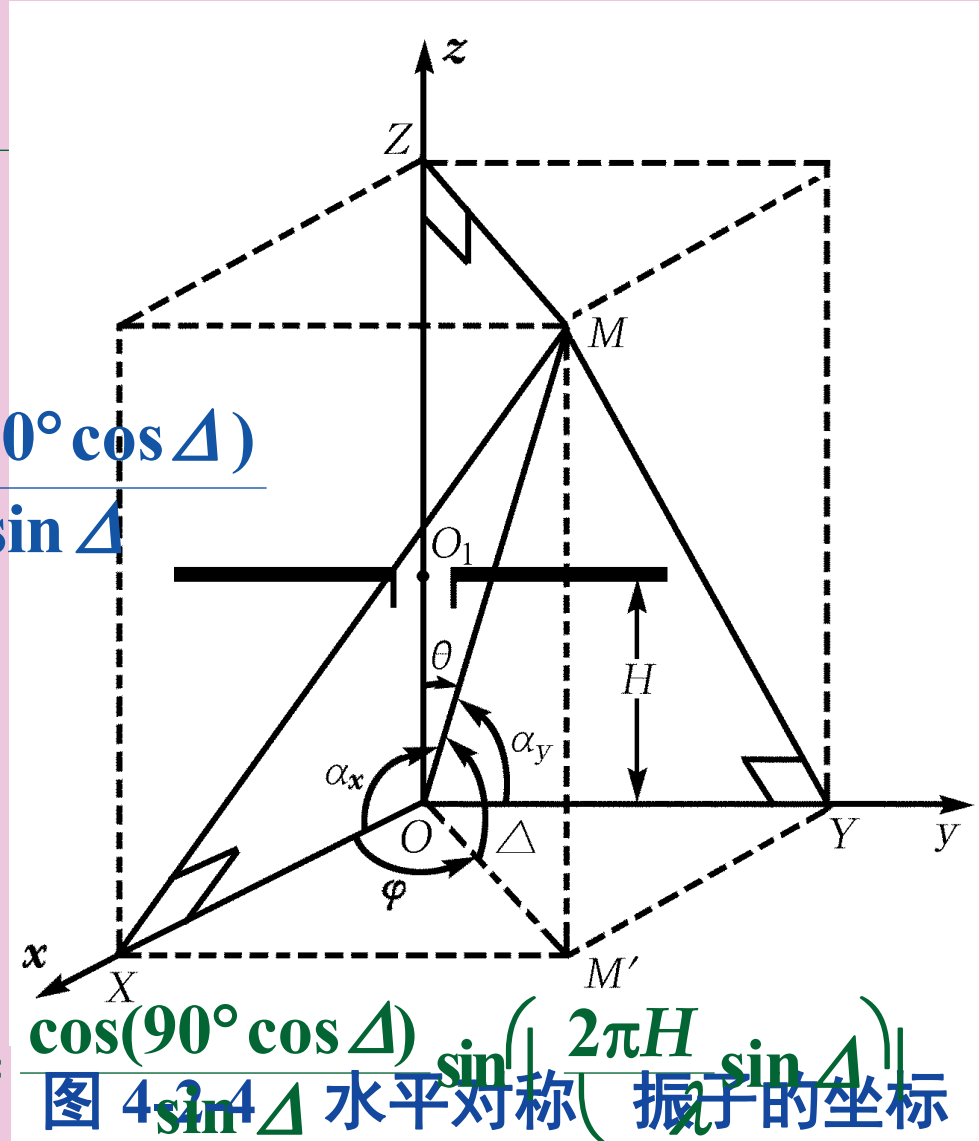
$$F_1(\Delta, \varphi) = \frac{\cos(90^\circ \cos \Delta \sin \varphi)}{\sqrt{1 - \cos^2 \Delta \sin^2 \varphi}}$$



$$F_1(\Delta, \varphi)|_{\varphi=90^\circ} = F_1(\Delta) = \frac{\cos(90^\circ \cos \Delta)}{\sin \Delta}$$

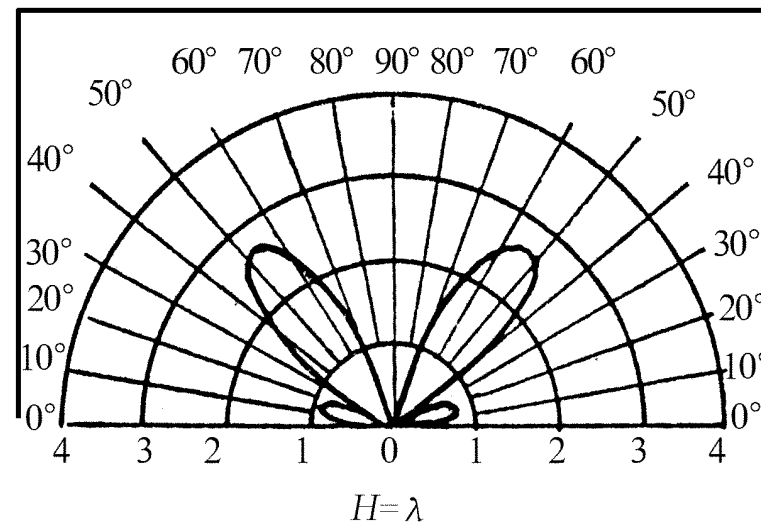
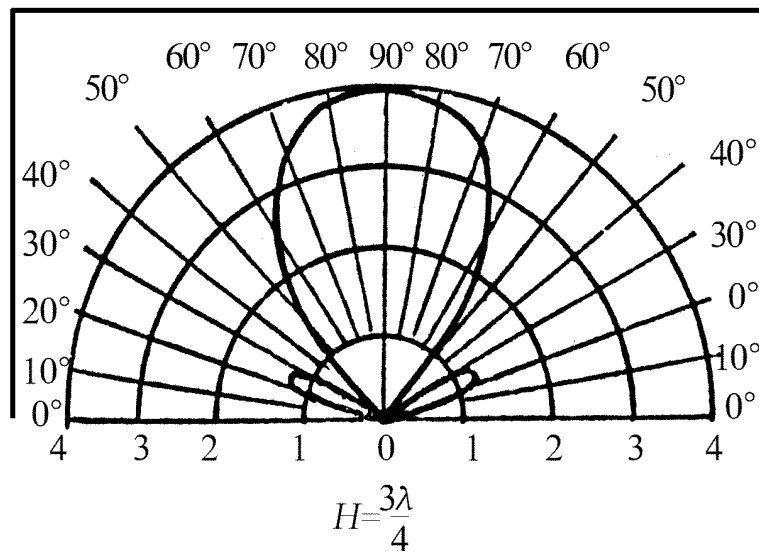
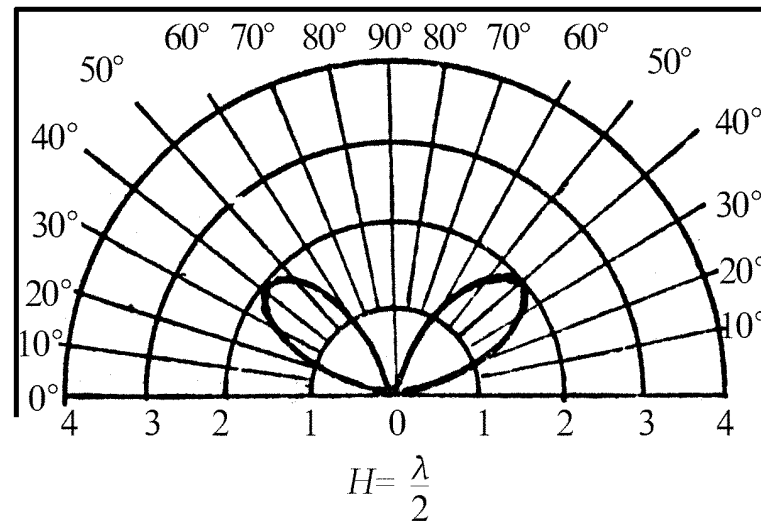
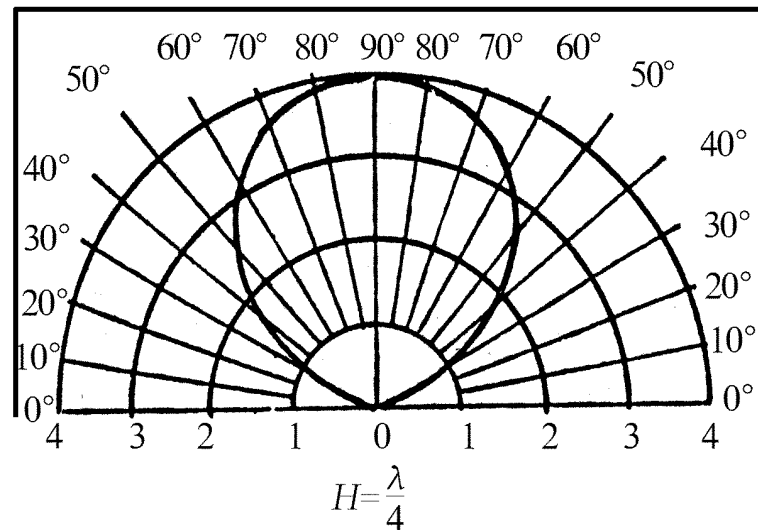
理想导电地面上水平半波对称振子子午面总的归一化方向性函数为

$$F(\Delta, \varphi)|_{\varphi=90^\circ} = F_1(\Delta)F_a(\Delta) = \frac{\cos(90^\circ \cos \Delta)}{\sin^4 \Delta} \sin\left(\frac{2\pi H}{\lambda} \sin \Delta\right)$$



不同架设高度  $H$  的水平半波对称振子子午面的方向性图。

子午面方向性图形状与赤道面相似，但除最大方向外其他方向辐射均变小，故通常工作在赤道面。



### 3. 水平对称振子在水平面内的方向性

$$\text{令 } \frac{2\pi H}{\lambda} \sin \Delta_{Mk} = \frac{(2k-1)\pi}{2} \quad F_a(\Delta) = \sin\left(\frac{2\pi H}{\lambda} \sin \Delta\right)$$
$$\Delta_{Mk} = \frac{(2k-1)\lambda}{4H} \quad (k=1,2,\dots)$$

水平天线架设高度  $H$  越高，使阵因子有最大值的  $k$  值越多，最大辐射仰角  $\Delta_M$  就越多。

在保持同样仰角的情况下， $k$  越大，所需  $H$  越大。

使阵因子有最大值的第 1 个仰角  $\Delta_{M1}$  与天线架设高度  $H$  的关系

$$H = \frac{\lambda}{4 \sin \Delta_{M1}} \quad \text{或} \quad \Delta_{M1} = \arcsin\left(\left|\frac{\lambda}{4H}\right|\right)$$

结论：天线架设高度  $H$  越低，第 1 个最大辐射方向的仰角  $\Delta_{M1}$  越大。

$$F_a(\Delta) = \sin\left(\frac{2\pi H}{\lambda} \sin \Delta\right)$$

$$H = \frac{\lambda}{2\pi \sin \Delta}$$

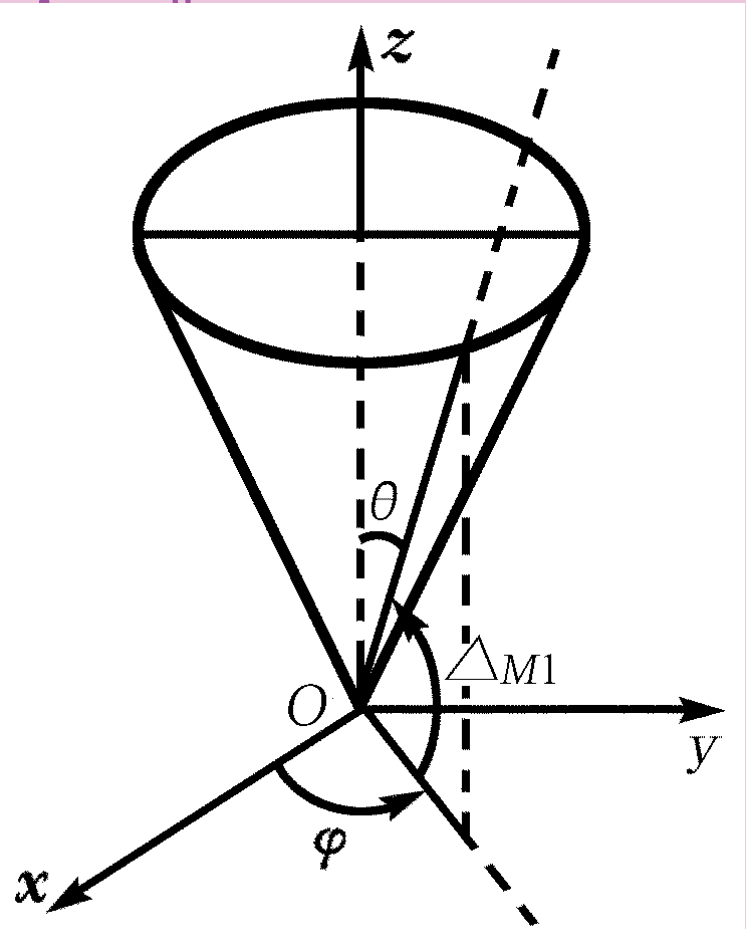
架设  
的仰角  $\Delta$

如果  
选择仰角

在水  
理想导

$F_a(\Delta) |_{\Delta}$

实



同性，

是指仰角（通常为最大方向）一定的情况下随水平面方位角变化的方向图，即并不是指几何意义上的水平面。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/115144341311011304>