

## 专题五：简单线天线

(第二章 简单线天线)

### 内 容

一、水平对称天线 (2.1 )

二、直立天线 (2.2 )

三、引向天线 (2.4)



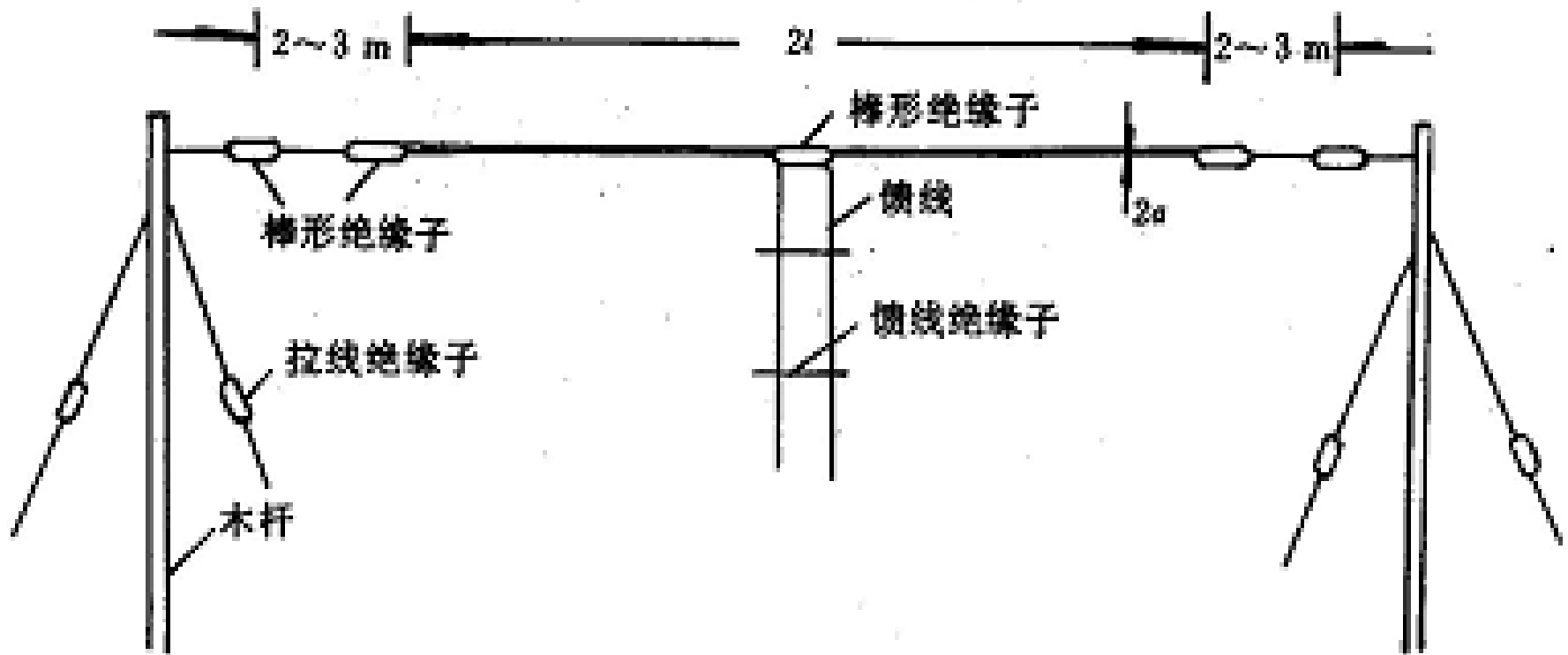
# 一、水平对称天线

### ◆ 本节要点

1. 水平对称天线的方向图
2. 水平对称天线尺寸的选择

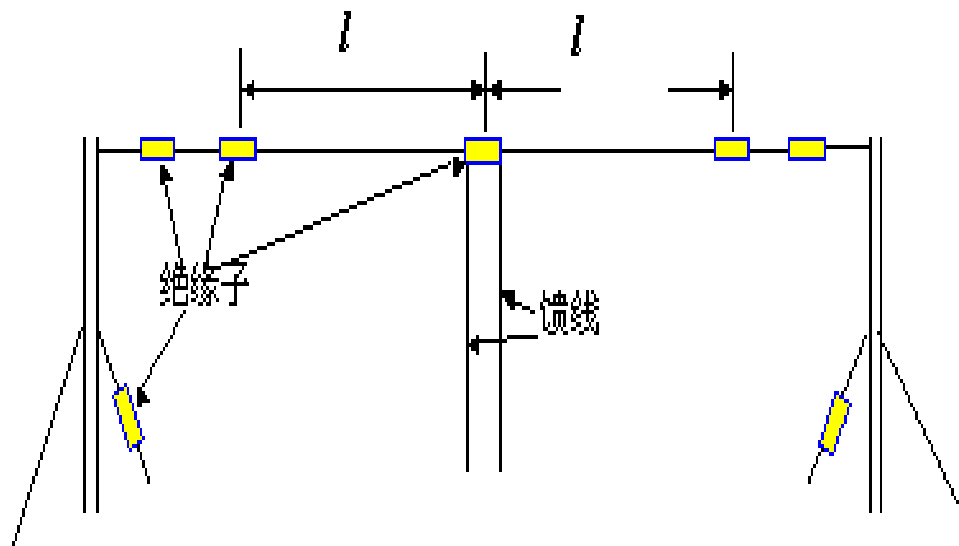
### 一、水平对称天线(horizontal dipole antenna)

(双极天线、水平振子天线、 $\pi$ 形天线)



水平对称天线结构

## 专题五：简单线天线



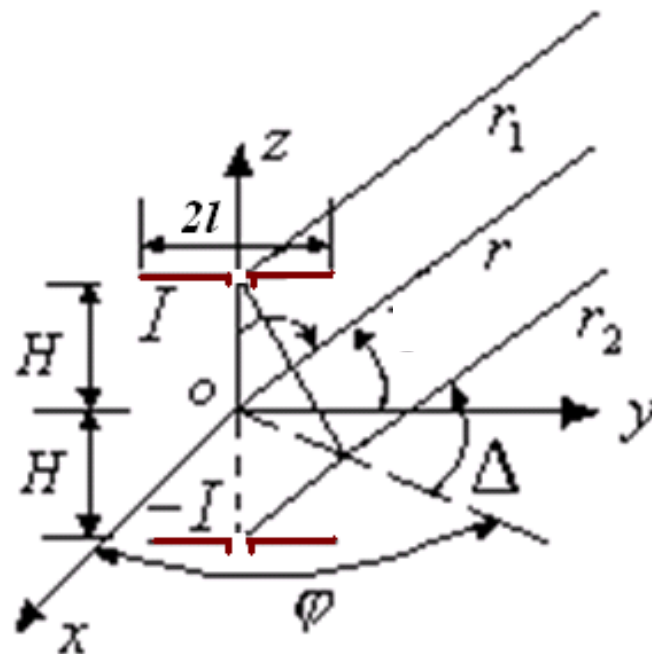
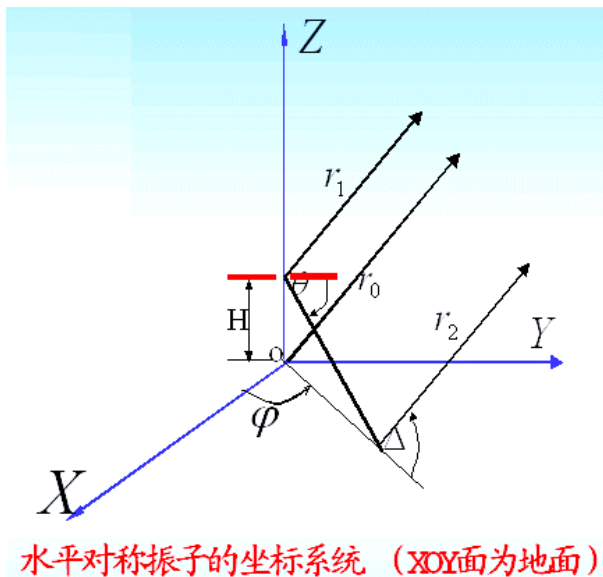
- ◆ 常应用于短波通信、电视或其它无线电系统中；
- ◆ 两臂由单根或多股铜线构成；
- ◆ 馈线采用 $600\Omega$ 的平行双导线；
- ◆ 拉线的电长度应较小（避免拉线上产生较大的感应电流）；
- ◆ 臂和支架采用高频绝缘子隔开，天线与周围物体要保持适当距离；

### 1. 水平对称天线的方向图

- ◆ 架设在地面上线天线的两个主平面，一般用垂直平面和水平平面来表示；
- 垂直平面：与地面垂直，且通过天线最大辐射方向的平面；
- 水平平面：与地面平行，且通过天线最大辐射方向的平面；
- 垂直平面方向图：垂直平面上，当方位角 $\varphi$ 及距离 $r$ 为常数时，电场强度随仰角 $\Delta$ 的变化曲线；
- 水平平面方向图：水平平面上，当仰角 $\Delta$ 及距离 $r$ 为常数时，电场强度随方位角的变化曲线；



## 专题五：简单线天线



- 根据**镜像原理**，架设在理想导电地面上的水平对称天线可用该天线及其镜像所构成的二元阵来分析。
- 该二元阵的两天线元是同幅反相的（负镜像）；

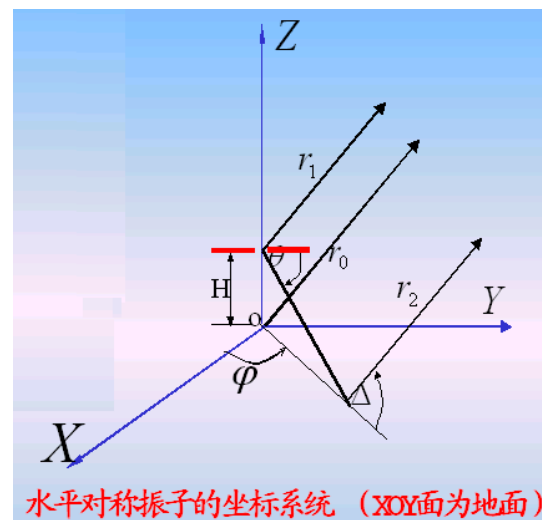
根据方向图乘积定理，则 
$$f(\Delta, \varphi) = f_1(\Delta, \varphi) \cdot f_a(\Delta, \varphi)$$

## 专题五：简单线天线

$$\text{其中: } f_1(\theta) = \left| \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta} \right| \quad (1-4-5)$$

$$f_a(\Delta) = |2 \sin(kH \sin \Delta)| \quad (1-7-1)$$

$$\begin{aligned} \text{又, } \quad \cos \theta &= \cos \Delta \sin \varphi \\ \sin \theta &= \sqrt{1 - (\cos \Delta \sin \varphi)^2} \end{aligned}$$

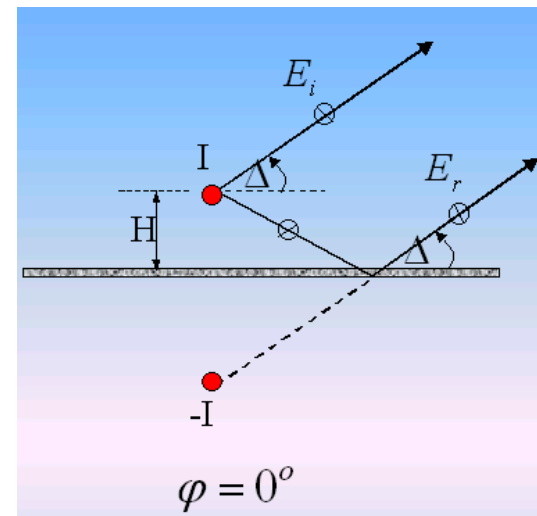


故，架设在地面上的水平对称天线的方向函数为：

$$f(\Delta, \varphi) = \left| \frac{\cos(kl \cos \Delta \sin \varphi) - \cos kl}{\sqrt{1 - \cos^2 \Delta \sin^2 \varphi}} \right| |2 \sin(kH \sin \Delta)|$$

## 专题五：简单线天线

### (1) 垂直平面方向图



$$f(\Delta, \varphi) = \left| \frac{\cos(kl \cos \Delta \sin \varphi) - \cos kl}{\sqrt{1 - \cos^2 \Delta \sin^2 \varphi}} \right| 2 \sin(kH \sin \Delta)$$

$\varphi = 0^\circ$  的垂直平面方向函数:

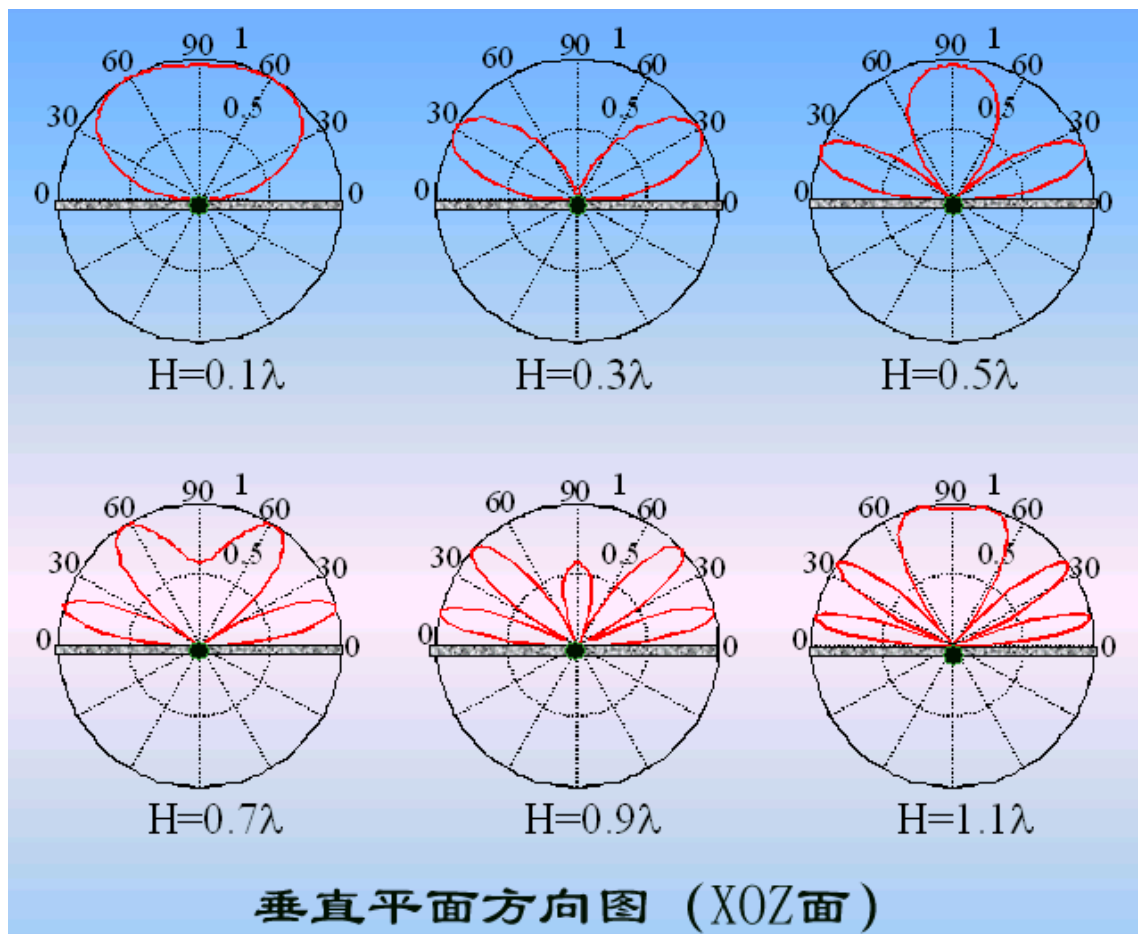
$$f_{xoz}(\Delta, \varphi = 0^\circ) = f_g(\Delta) = \left| \sin(kH \sin \Delta) \right| = \left| \sin\left(2\pi \frac{H}{\lambda} \sin \Delta\right) \right|$$

↓  
地因子



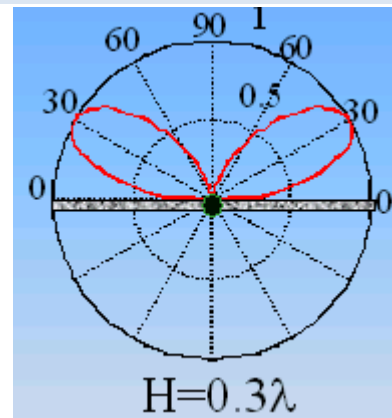
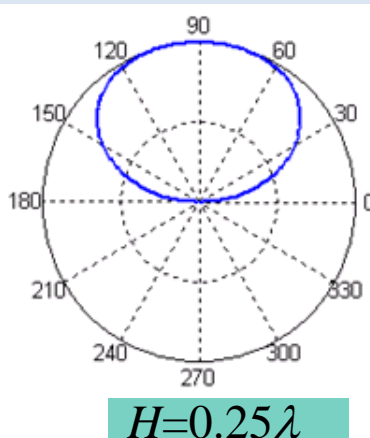
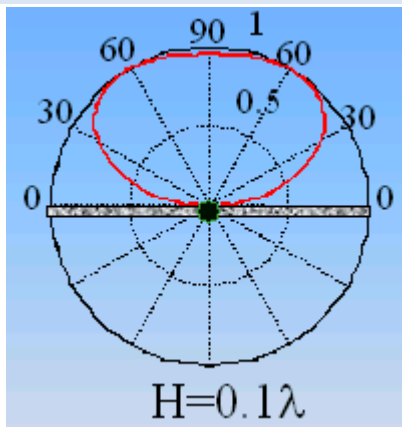
## 专题五：简单线天线

地面上的半波振子不同架设高度时  $\varphi=0^\circ$  的垂直平面方向图



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

在地面上的半波振子不同架设高度时  $\varphi=0^\circ$  的垂直平面方向图



## 结论

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

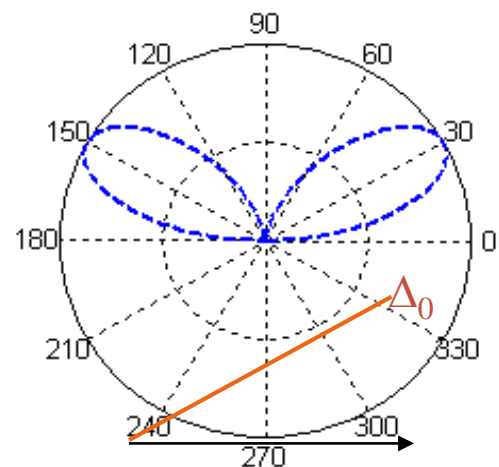
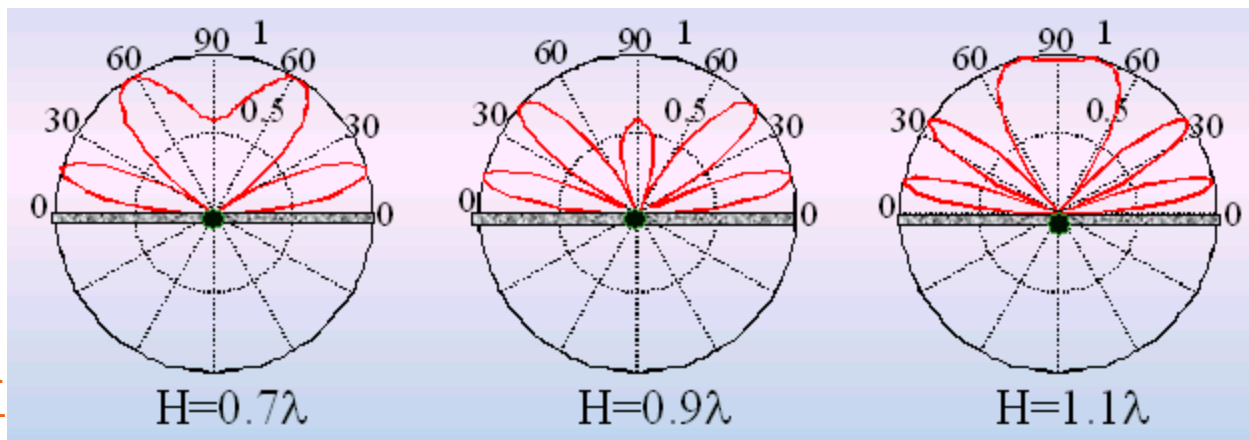
(1) 垂直平面方向图取决于  $H/\lambda$ ，与  $l/\lambda$  无关；不论  $H/\lambda$  为多大，沿地面方向（即  $\Delta=0^\circ$ ）辐射始终为零。

(2) 当  $H/\lambda \leq 0.25$ ，或放宽到  $H/\lambda < 0.3$  时，在  $\Delta=90^\circ$  方向上辐射最大，且在  $\Delta=60^\circ \sim 90^\circ$  范围内场强变化不大，即天线具有高仰角辐射特性；

具有高仰角辐射特性的天线称为高射天线。这种低架水平对称天线，广泛使用在300km以内的天波通信中。



## 在地面上的半波振子不同架设高度时 $\varphi=0^\circ$ 的垂直平面方向图



结论

(3) 垂直平面方向图随着  $H/\lambda$  的增大，波瓣增多，第一波瓣(最靠近地面的波瓣)最强辐射方向的仰角  $\Delta_{m1}$  越小。

在天波通信中，应使天线最大辐射方向的仰角  $\Delta_{m1}$  等于通信仰角  $\Delta_0$  ( $\Delta_0$  是根据通信距离及电离层反射高度来确定的)，由此可以确定天线的架设高度。所以天线的架设高度为：

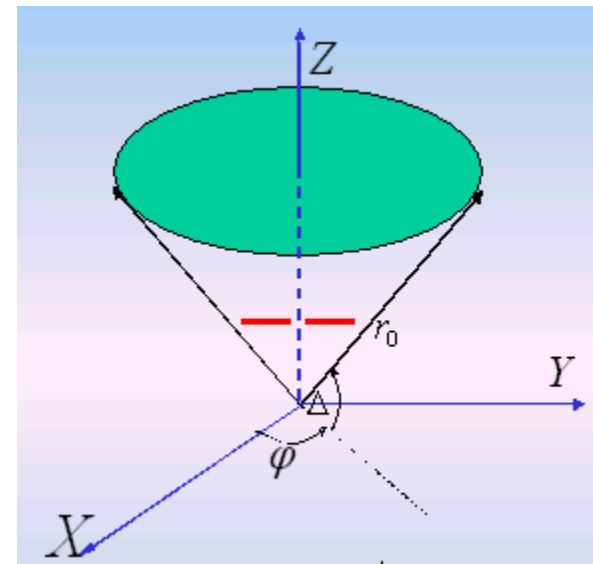
$$\text{令 } \sin(kH \sin \Delta_{m1}) = 1, \text{ 则 } \Delta_{m1} = \arcsin \frac{\lambda}{4H} \quad \text{又 } \Delta_{m1} = \Delta_0 \quad \boxed{H = \frac{\lambda}{4 \sin \Delta_0}}$$

➤ 当水平对称天线用作天波通信时，通信距离越远通信仰角越低，则要求天线架设高度越高。

## 专题五：简单线天线

### (2) 水平平面方向图：

仰角 $\Delta$ 为不同常数时的水平平面方向函数为：



$$\begin{aligned} |f(\varphi)| &= f_1(\varphi) \cdot f_g(\varphi) = \left| \frac{\cos(kl \cos \Delta \sin \varphi) - \cos kl}{\sqrt{1 - \cos^2 \Delta \sin^2 \varphi}} \right| \cdot |\sin(kH \sin \Delta)| \\ &= \left| \frac{\cos(kl \cos \Delta \sin \varphi) - \cos kl}{\sqrt{1 - \cos^2 \Delta \sin^2 \varphi}} \right| \end{aligned}$$

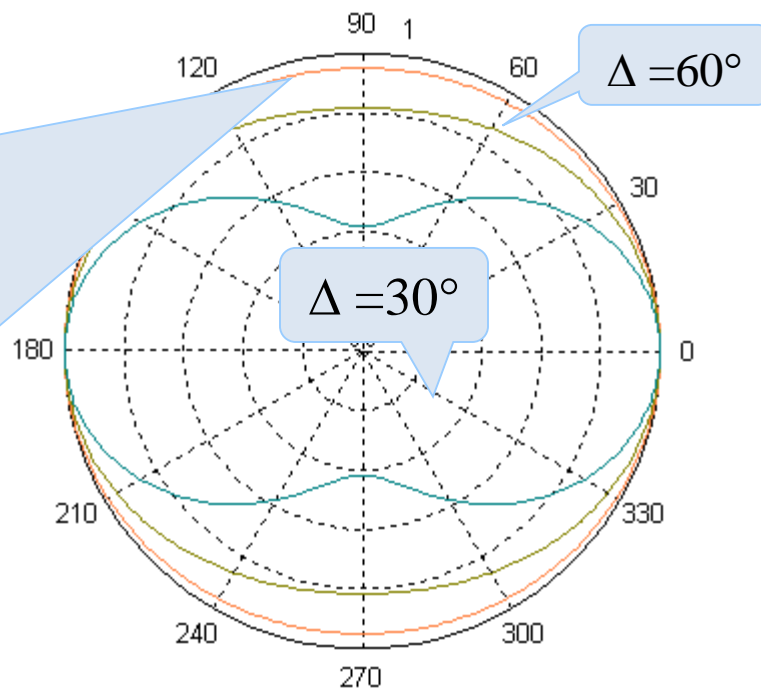
◆ 水平面方向图与臂长  $l$  和仰角  $\Delta$  有关；

## 专题五：简单线天线

仰角 $\Delta$ 为不同常数时的水平面方向图（确定臂长和架设高度）

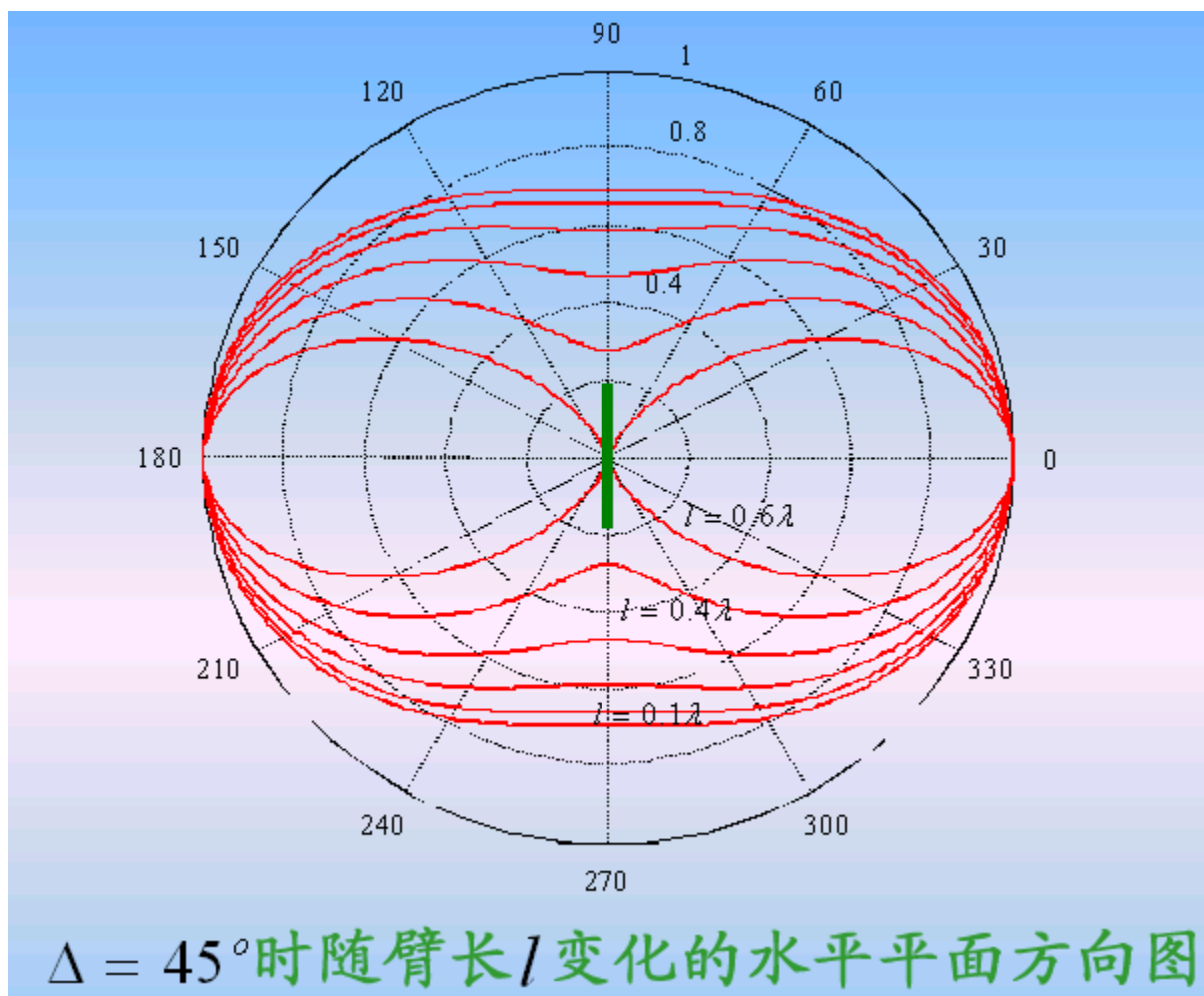
$\Delta=75^\circ$

由于高仰角水平平面方向性不明显，因此在短波300km以内距离的通信时，常把它作全方向性天线使用。

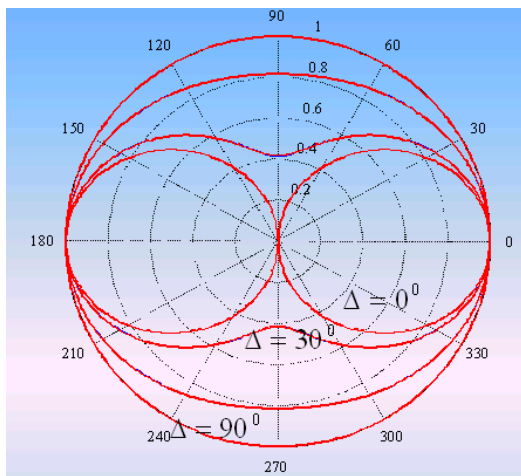


不同仰角 $\Delta$ 时的水平平面方向图与架设高度无关，但跟天线仰角有关，并且仰角越大，其方向性越弱。

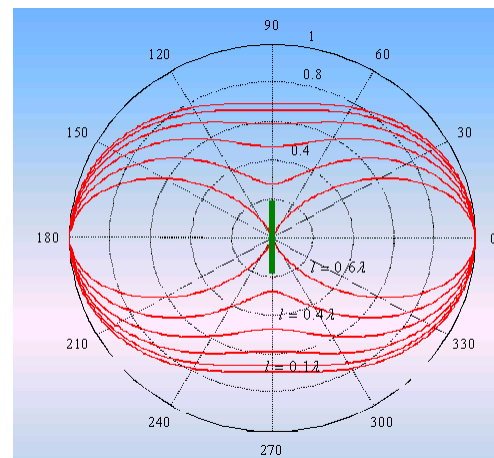
## 专题五：简单线天线



## 专题五：简单线天线



架高 $h=0.25\lambda$ 时, 臂长 $l=0.25\lambda$



$\Delta = 45^\circ$

### 结论:

- ① 水平面方向图与架高 $H/\lambda$ 无关;
- ② 水平面方向图的形状取决于 $l/\lambda$ ,  $l/\lambda$  越小, 方向性越不明显; 当 $l/\lambda \leq 0.7$ 时, 最大辐射方向在  $\varphi=0^\circ$  方向;
- ③ 仰角越大时, 水平面方向性越不显著

### 水平对称天线方向性之结论：

① 天线的电长度 $l/\lambda$ 只影响水平面方向图，对垂直面方向图没有影响；

架高 $H/\lambda$ 只影响垂直面方向图，对水平面方向图没有影响；

**推论：**控制天线的长度可以控制水平面方向图；

控制天线的架设高度可以控制垂直面方向图；

② 当 $H/\lambda \leq 0.3$  时，在高仰角方向辐射最强；，且水平面方向性不明显，因此对于天线架设方位要求不严格；

③ 对于远距离通信，为了保证天线最大辐射方向与通信方向一致，应根据通信距离选择通信仰角，由通信仰角再确定天线的架设高度；

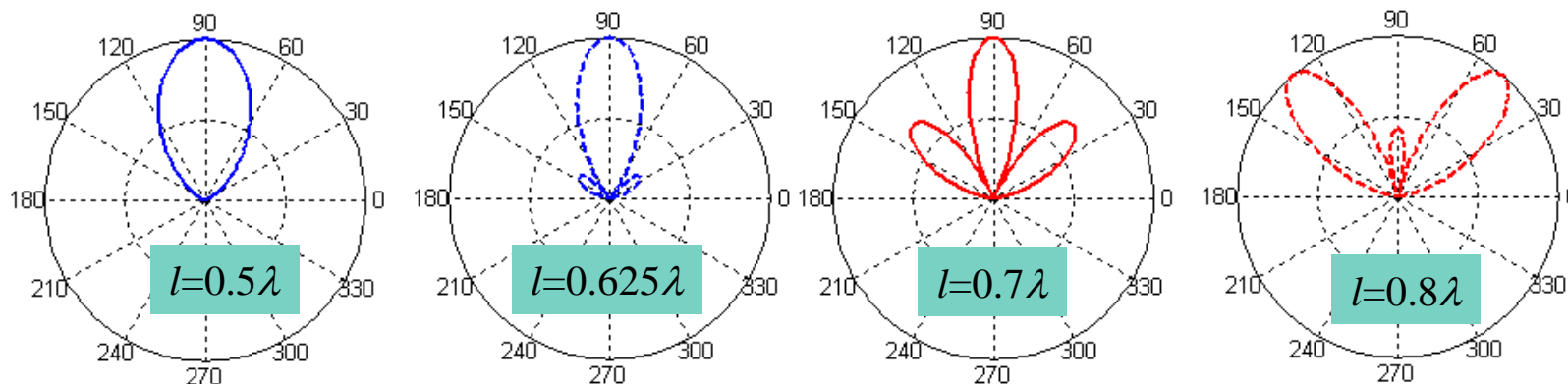
④ 为保证天线在 $\varphi=0^\circ$  方向辐射最强，单臂电长度 $l/\lambda \leq 0.7$ ；





### 2. 水平对称天线尺寸的选择

#### (1) 臂长 $l$ 的选择



架设高度 $H=0.25\lambda$ 时，水平振子天线不同臂长的方向图

- 为保证水平振子天线在较宽的频带范围内最大辐射方向不发生偏移，应选择振子的臂长 $l \leq 0.7\lambda_{\min}$ ，以保证在与振子轴垂直的方向上始终有最大辐射。
- 但当 $l$ 太短时，天线的辐射能力变弱，效率将很低，加上天线的输入电阻太小而容抗很大，要实现天线与馈线的匹配就比较困难，因而天线的臂长又不能太短。若要求馈线上行波系数不小于0.1，通常要求 $l \geq 0.2\lambda_{\max}$
- 通常选择振子的臂长在下述范围内： $0.2\lambda_{\max} \leq l \leq 0.7\lambda_{\min}$

## 专题五：简单线天线

### (2) 天线架设高度H的选择

**原则：** 保证在工作波段内通信仰角方向上的辐射较强；

- ① 通信距离在300km之内，采用高射天线，取架设高度 $H=(0.1\sim0.3)\lambda$ ；
- ② 通信距离较远时，保证天线的最大辐射与所需的通信仰角一致，则

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



### 作业：

- 1、 2 、 3 、 4



### 二、直立天线（单极天线、鞭状天线）

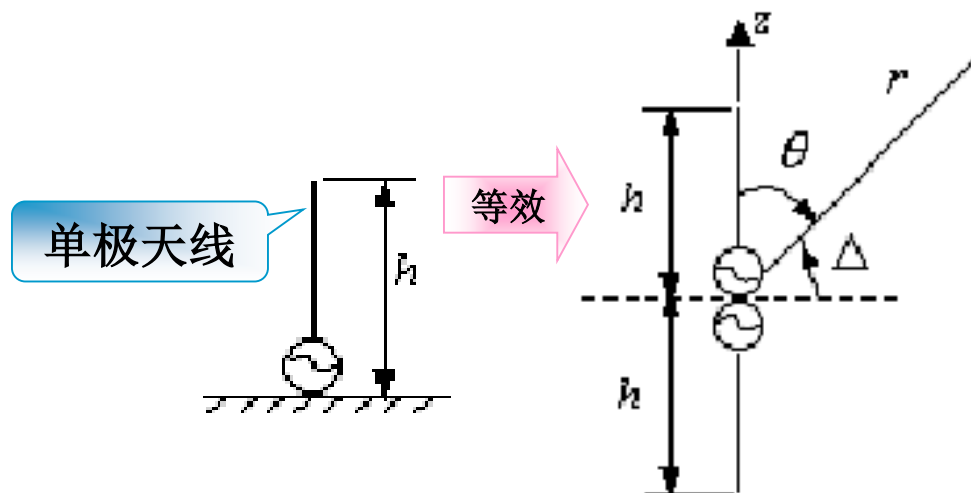
#### ◆ 本节要点

1. 鞭状天线的辐射场及方向图
2. 鞭状天线的有效高度
3. 提高鞭状天线效率的方法

### 二、直立天线 (vertical antenna)

**定义：**垂直于地面或导电平面架设的天线；

- 广泛地应用于长、中、短波及超短波波段；
- 假设地面可视为理想导体，则地面的影响可用**天线的镜像**来替代。
- 直立天线可等效为一对对称振子；



此等效只是在地面或导体的上半空间成立

### 1. 鞭状天线的辐射场及方向图

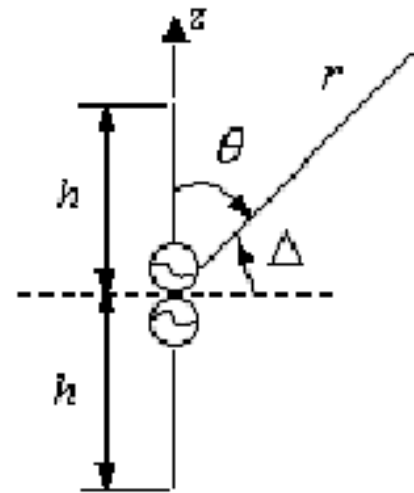
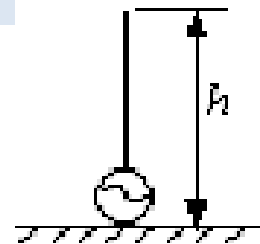
在理想导电平面上的直立天线的辐射场，可直接应用自由空间对称振子的公式进行计算，即：

$$E_{\theta} = j \frac{60 I_m}{r} e^{-jkr} \frac{\cos(kh \cos \theta) - \cos kh}{\sin \theta}$$

其中， $k = 2\pi/\lambda$ ， $I_m$ 为波腹点电流，工程上常采用输入电流 $I_0$ 表示。

波腹点电流与输入点电流的关系为： $I(0) = I_m \sin k(h - 0) = I_0$

$$\text{即, } I_m = \frac{I_0}{\sin kh}$$



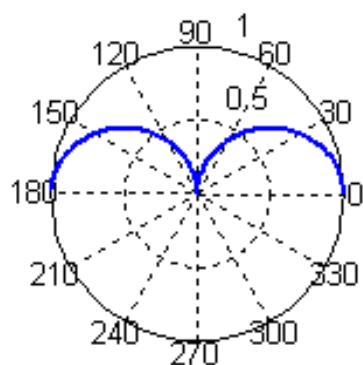
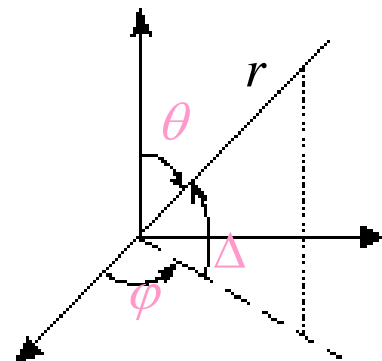
## 专题五：简单线天线

因此，架设在理想导电平面上的鞭状天线的方向函数为：

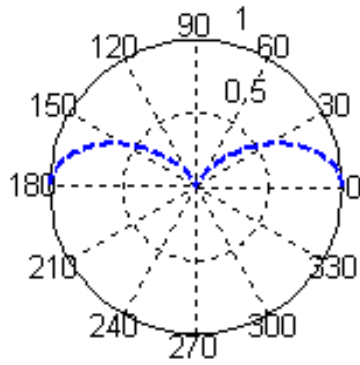
$$F(\Delta) = \frac{\cos(kh \sin \Delta) - \cos kh}{\cos \Delta}$$

水平面方向图：仍然为圆。

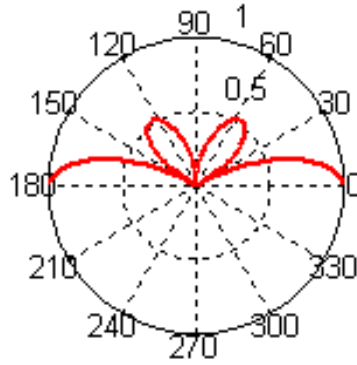
垂直平面方向图：



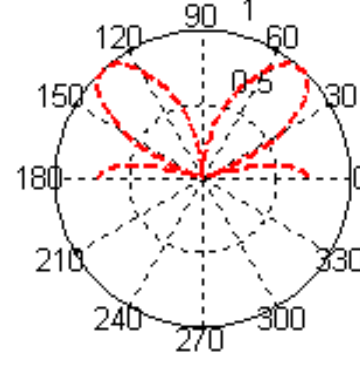
$h/\lambda=0.25$



$h/\lambda=0.5$



$h/\lambda=2/3$



$h/\lambda=0.75$

- 当  $h/\lambda$  逐渐增大时，波瓣变尖；
- 当  $h/\lambda > 0.5$  时，出现旁瓣；当  $h/\lambda$  继续增大时，由于天线上反相电流的作用，沿  $\Delta=0^\circ$  方向上的辐射减弱。
- 实际中一般取  $h/\lambda = 0.53$  左右。

### 说 明：

- 实际上大地为非理想导电体。

因此，实际架设在地面上的鞭状天线方向图与上述方向图有些差别，准确计算单极天线的远区场应考虑地面的影响。





### 2. 鞭状天线的有效高度

设天线归为输入点的电流表达式为：

$$I(z) = I_m \sin k(h - z) = \frac{I_0}{\sin kh} \sin k(h - z)$$

根据等效高度的定义，归于输入点电流的有效高度为：

$$I_0 h_{\text{ein}} = \int_0^h I(z) dz$$

将电流 $I(z)$ 表达式代入上式即得：
$$h_{\text{ein}} = \frac{1 - \cos kh}{k \sin kh}$$

若 $h \ll \lambda$ ，则有：

$$h_{\text{ein}} = \frac{1}{k} \tan \frac{kh}{2} \approx \frac{h}{2}$$

- 当单极天线的高度远小于一个波长时，其有效高度约为实际高度的一半。

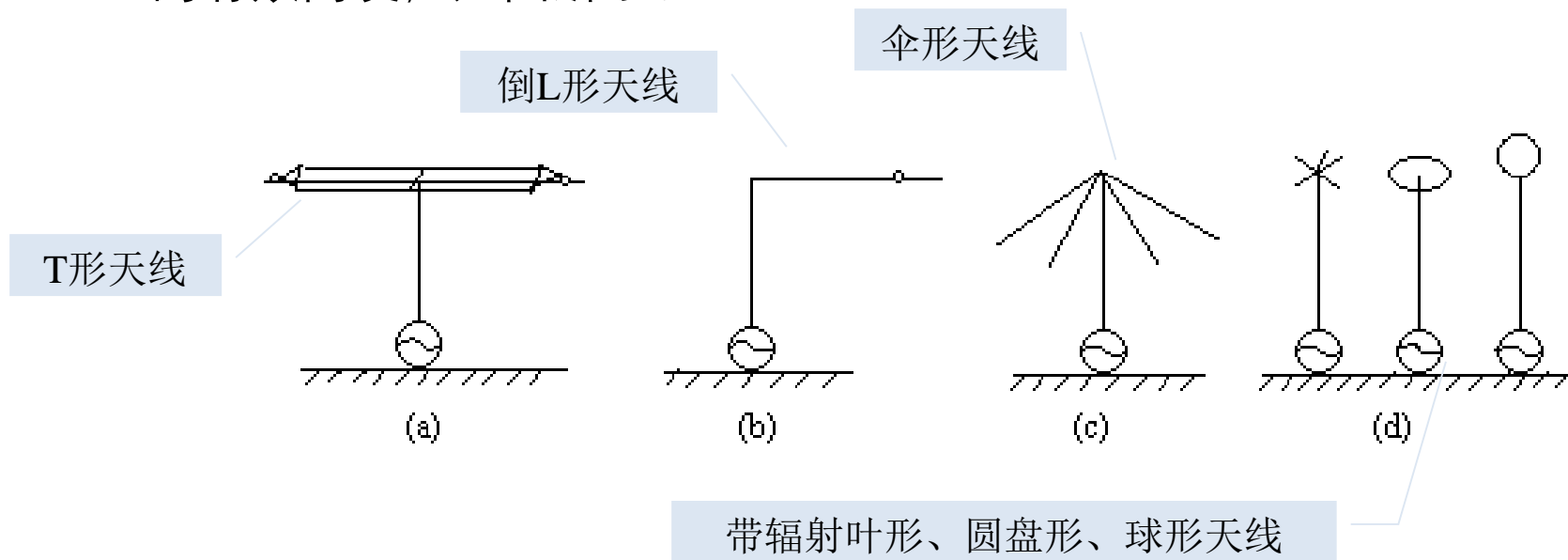


### 3. 提高鞭状天线效率的方法

提高鞭状天线效率的方法：**1.提高辐射电阻（加载）；**  
**2.降低损耗电阻（接地）。**

#### 1) 提高天线的辐射电阻

采用在顶端加容性负载和在天线中部或低部加感性负载；  
这些方法都提高了天线上电流波腹点的位置，因而等效为增加了天线的有效高度，如图所示。



## 专题五：简单线天线

- 鞭状天线顶端的线、板等统称为**顶负载**。
- 作用是使天线顶端对地的分布电容增大。

当 $h \ll \lambda$ 时，加顶后，天线归于输入点电流的有效高度为：

$$h'_{\text{ein}} \approx h \left( 1 - \frac{h}{2h_0} \right) > 0.5h$$

- 天线加顶后有效高度提高了，从而提高了天线的效率。



### 2) 降低损耗电阻

◆ 鞭状天线的铜损耗和周围介质损耗都相对不大，主要损耗来自于接地系统。

接地系统的损耗由两个因素引起：

1. 天线电流经地面流入接地系统时所产生的损耗——电场损耗，
2. 天线上的电流产生磁场，磁场作用在地表面上，地表面将产生径向电流，此电流流过有耗地层时将产生损耗——磁场损耗。

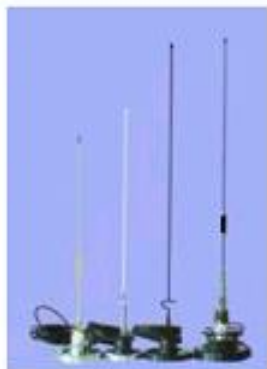
- 对于天线电高度较小的直立天线而言，磁场损耗是主要的；
- 减小磁场损耗一般采用在**天线底部加辐射状地网**的方式。

◆ 鞭状天线的方向增益较低；

◆ 要提高其方向性，在超短波波段也可以采用在垂直于地面的方向上排阵，这就是直立共线阵。



### 实物样品展示



车载天线

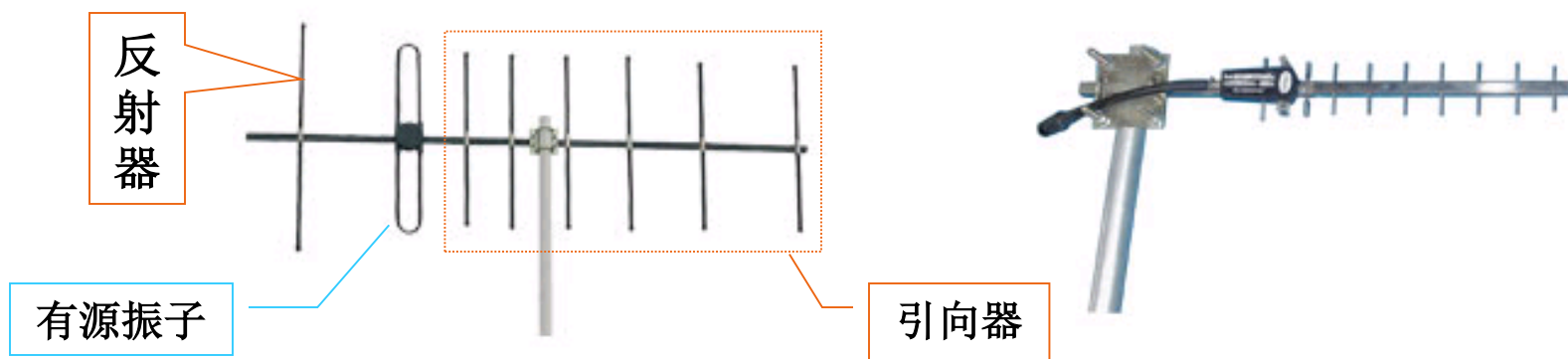


公话(modem)天线



### 三、引向天线

- 引向天线又称**八木-宇田天线**(Yagi-Uda antenna);
- 由一个有源振子及若干个无源振子组成;
- 广泛地应用于米波、分米波波段的通信、雷达、电视及其它无线电系统中。



### 1、二元阵引向天线的工作原理

由天线阵理论可知，排阵可以增强天线的方向性，而改变各单元天线的电流分配比可以改变方向图的形状，以获得我们所需要的方向性。

◆引向天线实际上也是一个天线阵

◆不同的是：

- 只对其中的一个振子馈电；
- 其余振子靠与馈电振子之间的近场耦合所产生的感应电流来激励；
- 感应电流的大小取决于各振子的长度及其间距；

**结论：**调整各振子的长度及其间距可以改变各振子之间的电流分配比，从而达到控制天线方向性的目的。

以二元阵为例，来说明引向天线的工作原理。



## 专题五：简单线天线

设振子“1”为有源振子，“2”为无源振子，两振子沿y向放置，沿z轴排列，间距为 $d$ ，并假设振子电流按正弦分布，其波腹电流表达式分别为：

$$\begin{cases} I_1 = I_0 \\ I_2 = mI_0 e^{j\zeta} \end{cases}$$

其中， $m$ 为两振子电流的振幅比， $\zeta$ 为两振子电流的相位差，它们均取决于振子的长度及其间距。

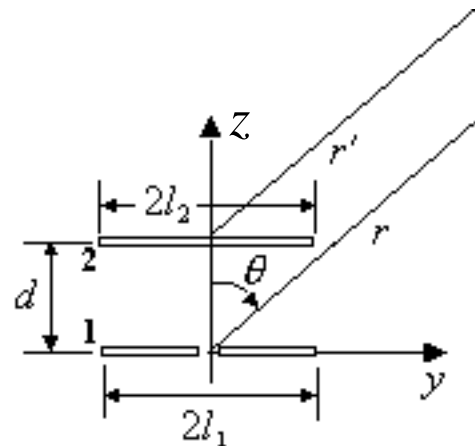
根据天线阵理论，此二元引向天线的辐射场为：

$$E = E_1 + E_2 \approx E_1 \left[ 1 + me^{j(\zeta + kd \cos \theta)} \right] = \frac{60I_1}{r} F_1(\theta) \cdot F_a(\theta)$$

式中， $F_1(\theta)$ 和 $F_a(\theta)$ 分别为有源对称振子与二元阵阵因子方向函数。

$$F_a(\theta) = 1 + me^{j(\zeta + kd \cos \theta)}$$

两振子的电流振幅比 $m$ 及其相位差 $\zeta$ 由耦合振子理论求得。





### (1) 耦合振子理论

结论：
$$\frac{I_{m2}}{I_{m1}} = -\frac{Z_{21}}{Z_{22}} = me^{j\zeta}$$

式中： $Z_{22}$ 为振子“2”的自辐射阻抗；

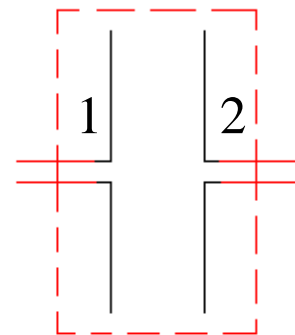
$Z_{21}$ 为振子“1”和“2”归于波腹电流的互(辐射)阻抗；

故，
$$\begin{cases} m = \sqrt{\frac{R_{21}^2 + X_{21}^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2}} \\ \zeta = \pi + \operatorname{arctg} \frac{X_{21}}{R_{21}} - \operatorname{arctg} \frac{X_{22}}{R_{22}} \end{cases}$$

结论：

改变两振子的自阻抗和互阻抗，就可以改变两振子的电流分配比。

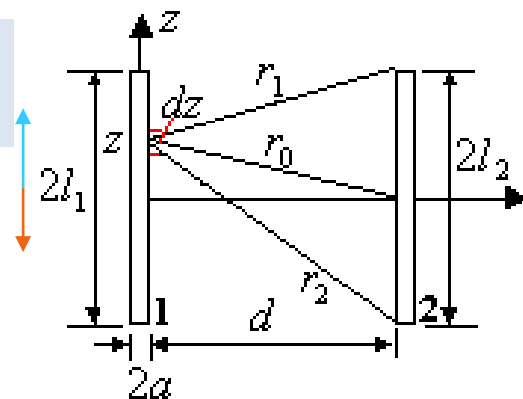
只要得到自阻抗和互阻抗，两振子的电流振幅比 $m$ 及其相位差 $\zeta$ 就可求得。



## 专题五：简单线天线

### (2) 感应电动势法计算自阻抗和互阻抗

设振子“1”和振子“2”均沿 $z$ 轴放置



理论计算和实验表明：细耦合振子上的电流分布仍和正弦分布相差不大，因此在工程计算上，将耦合振子的电流仍看作是正弦分布，即：

$$I_1(z) = I_{m1} \sin k(l_1 - |z|)$$

考虑到 $I_{m1}=I_{m2}$ 时，互阻抗 $Z_{12}=Z_{21}$ ，

$$Z_{12} = j30 \int_{-l_1}^{l_1} \sin k(l_1 - |z|) \left[ \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} + \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} - \cos(kl_2) \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \right] dz$$
$$\begin{cases} r_0 = \sqrt{d^2 + z^2} \\ r_1 = \sqrt{d^2 + (l_2 - z)^2} \\ r_2 = \sqrt{d^2 + (l_2 + z)^2} \end{cases}$$

## 专题五：简单线天线

同理得振子的自阻抗表达式：

$$\begin{cases} Z_{11} = j30 \int_{-l_1}^{l_1} \sin k(l_1 - |z|) \left[ \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} + \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} - \cos(kl_1) \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \right] dz \\ Z_{22} = j30 \int_{-l_2}^{l_2} \sin k(l_2 - |z|) \left[ \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} + \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} - \cos(kl_2) \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \right] dz \end{cases}$$

$$\begin{cases} r_0 = \sqrt{a^2 + z^2} \\ r_1 = \sqrt{a^2 + (l_2 - z)^2} \\ r_2 = \sqrt{a^2 + (l_2 + z)^2} \end{cases}$$

结论：

自阻抗主要取决于振子的长度；

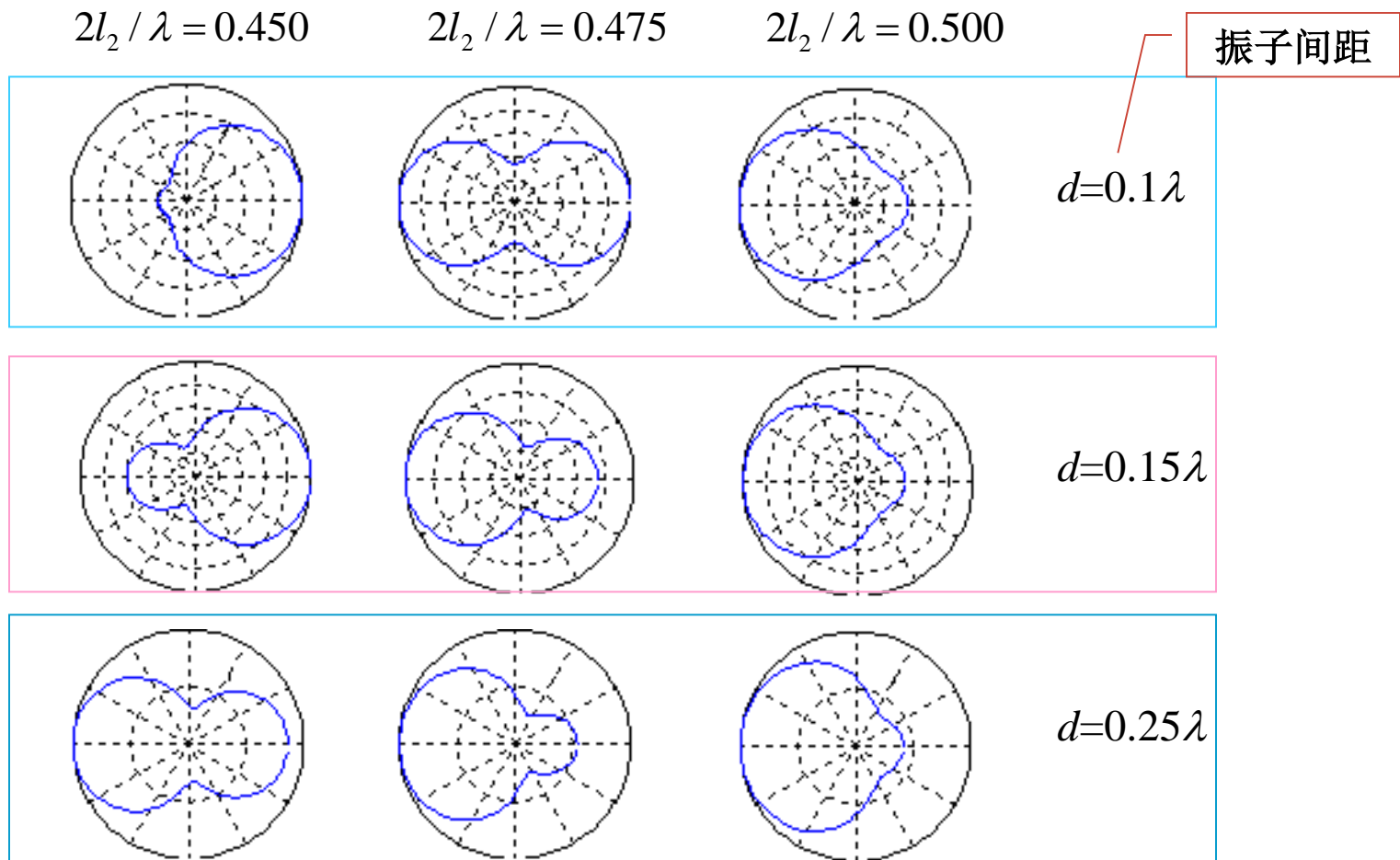
互阻抗取决于振子的长度及振子之间的距离。



## 专题五：简单线天线

### (3) 无源振子的作用

有源振子的长度为 $2l_1/\lambda=0.475$ ，无源振子长度变化的H面方向图



# 结论

- (1) 当无源振子与有源振子的间距 $d < 0.25\lambda$ 时，无源振子的长度短于有源振子的长度时，由于无源振子电流相位滞后于有源振子，故二元引向天线的最大辐射方向偏向无源振子所在方向；
- (2) 当无源振子的长度长于有源振子的长度时，此时，无源振子的电流相位超前于有源振子，故二元引向天线的最大辐射方向偏向有源振子所在方向；
- (3) 在这两种情况下，无源振子分别具有引导或反射有源振子辐射场的作用，故称为引向器或反射器。  
因此，通过改变无源振子的尺寸及与有源振子的间距来调整它们的电流分配比，就可以达到改变引向天线的方向图的目的。
- (4) 一般情况下，无源振子与有源振子的间距取 $d = (0.15 \sim 0.23)\lambda$ ，  
当无源振子作引向器时，长度取为 $2l_2 = (0.42 \sim 0.46)\lambda$ ，  
当无源振子作反射器时，长度取为 $2l_2 = (0.50 \sim 0.55)\lambda$ 。



### 2、多元引向天线

对于总元数为 $N$ 的多元引向天线，其分析方法与二元引向天线的分析方法相似。

设第一根振子为反射器，第二根为有源振子，第三至第 $N$ 根振子为引向器，则多元引向天线的 $H$ 面方向函数为：

$$|F(\theta)| = \left| \sum_{i=1}^N m_i e^{j(kd_i \cos \theta + \zeta_i)} \right|$$



式中， $m_i = I_i/I_2$ ，它表示第 $i$ 根振子上的电流振幅与有源振子上电流振幅之比；

$\zeta_i$ 表示第 $i$ 根振子上的电流相位与有源振子上电流相位之差；

$d_i$ 表示第 $i$ 根振子与有源振子之间距。

## 专题五：简单线天线

由耦合振子的理论，N元引向天线应满足下列方程：

$$U_n = \sum_{i=1}^N I_i Z_{ni}, (n = 1, 2, 3, \dots, N)$$

其中， $I_i$ 表示第*i*根振子上的电流振幅；当 $n=i$ 时， $Z_{ni}$ 表示第*i*根振子的自阻抗；当 $n \neq i$ 时， $Z_{ni}$ 表示第*i*根振子与第*n*根振子的互阻抗； $U_n$ 表示第*n*根振子上的外加电压。

对于引向天线有：

$$\begin{cases} U_1 = U_3 = U_4 = \dots = U_N = 0 \\ U_2 = U_0 \end{cases}$$

当N比较大时，要解上述方程计算量是相当可观的。因此，对于多元引向天线一般借助数值解法。



## 专题五：简单线天线

在工程上，多元引向天线的方向系数可用下式近似计算：

$$D = K_1 \frac{L}{\lambda}$$

其中， $L$ 是引向天线的总长度，也就是从反射器到最后一根引向器的距离； $K_1$ 是比例常数。

主瓣半功率波瓣宽度近似为：

$$2\theta_{0.5} = 55^\circ \sqrt{L / \lambda}$$

注意：

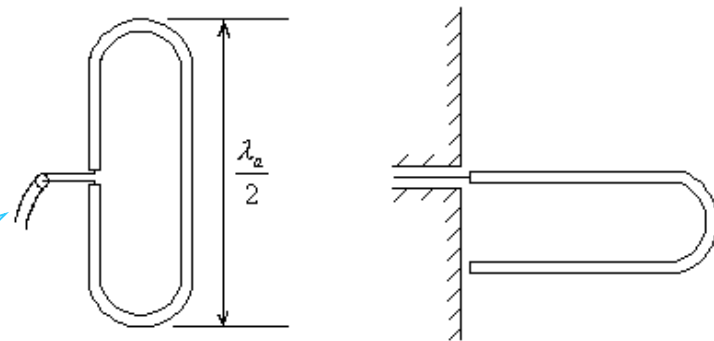
- 在引向天线中，无源振子虽然使天线方向性增强，但由于各振子之间的相互影响，又使天线的工作频带变窄，输入阻抗降低，有时甚至低至十几欧姆，不利于与馈线的匹配。
- 为了提高天线的输入阻抗和展宽频带，引向天线的有源振子常采用折合振子。



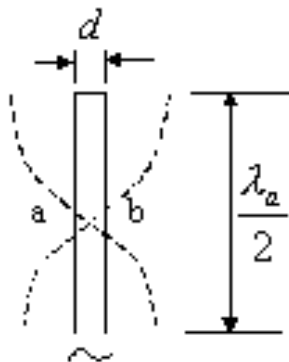


### 3、折合振子 (folded dipoles)

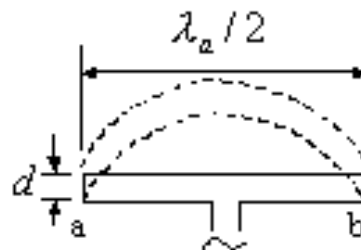
同轴馈电



- 折合振子可看成是长度为 $\lambda_a/2$ 的短路双线传输线在纵长方向折合而成；
- 实际是两个非常靠近且平行的半波振子在末端相连后构成的，但仅在一根振子的中部馈电。



(a) 短路双线传输线



(b) 折合振子

## 专题五：简单线天线

根据耦合振子理论，折合振子的总辐射阻抗为：

$$Z_{\Sigma} = Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} = Z_{11} + Z_{12} + Z_{21} + Z_{22}$$

由于两振子间距很小，因此有：

$$Z_{11} \approx Z_{12} \approx Z_{21} \approx Z_{22}$$

所以，折合振子的辐射阻抗等于半波振子辐射阻抗的四倍：

$$Z_{\Sigma} = 4Z_{11}$$

◆对于半波振子的输入阻抗为纯电阻，且输入阻抗等于辐射阻抗，所以折合振子的输入阻抗为：

$$Z_{\text{in}} = 4R_{\Sigma} = 300(\Omega)$$

因此，折合振子容易与馈线匹配。

另外，折合振子相当于加粗的振子，所以工作带宽也比半波振子的宽。



### 作业：

- 1、 2 、 3 、 4
- 8 、 12 、 13 、 14