



天线与电波传播

郭璐

南京理工大学，电光学院通信工程系

2023年春季学期

办公室: 电光院A342

Email: lu.guo@njust.edu.cn





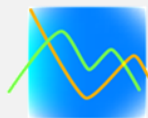
第2章 简单线天线

2.1 水平对称天线

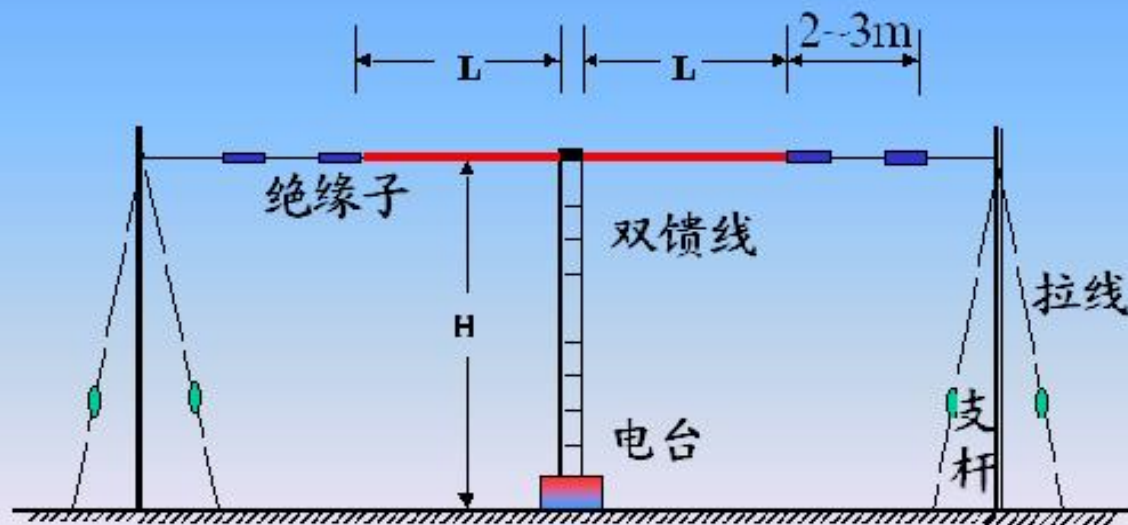
2.2 直立天线

2.3 环形天线

2.4 引向天线与背射天线



2.1.1 双极天线



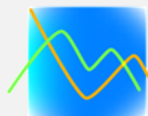
L : 臂长 H : 架高

双极天线

水平天线放置的理由：

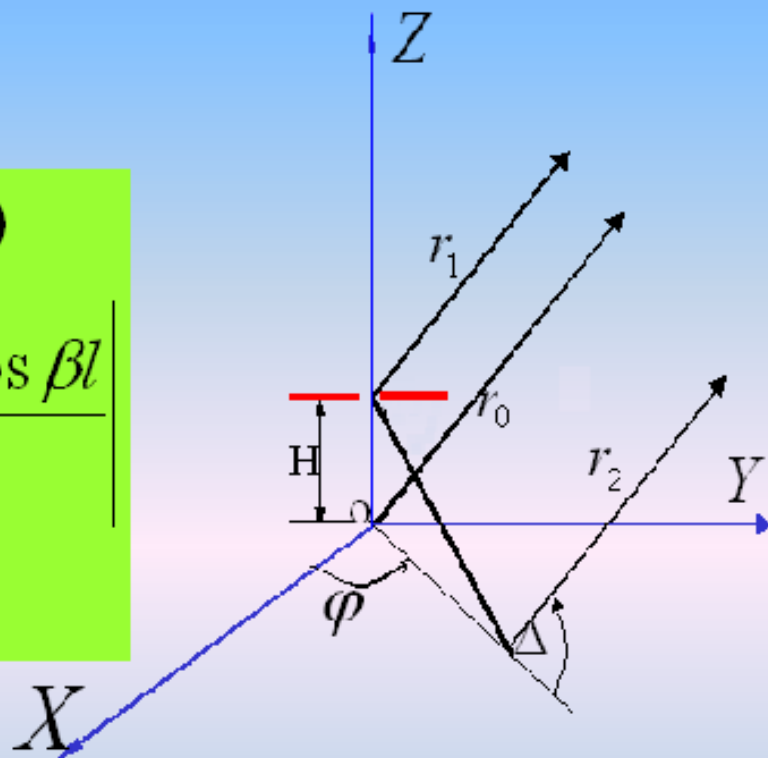
- (1) 架设和馈电方便；
- (2) 地面电导率变化对水平天线的影晌较垂直天线小；
- (3) 考虑到工业干扰大多为垂直极化波，可减小干扰对接收的影响。

300km范围内短波移动通信常用 $L=12\text{m}$ 或 22m ， $H=10\text{m}$ 的
双极天线，架设高度 $<0.3\lambda$ ，高空方向辐射最强。



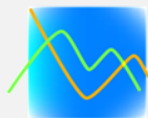
方向函数：

$$\begin{aligned} f(\varphi, \Delta) &= f_0(\varphi, \Delta) \cdot f_g(\Delta) \\ &= \left| \frac{\cos(\beta l \cos \Delta \sin \varphi) - \cos \beta l}{\sqrt{1 - \cos^2 \Delta \sin^2 \varphi}} \right| \\ &\quad \cdot 2|\sin(\beta h \sin \Delta)| \end{aligned}$$



水平对称振子的坐标系（XOY面为地面）

Δ 、 φ 表示射线仰角及方位角



2.1.1 双极天线

$$\cos\theta = \frac{OA}{OP} = \frac{OP'}{OP} \cdot \frac{OA}{OP'} = \cos\Delta \sin\varphi$$

$$\sin\theta = \sqrt{1 - \cos^2\Delta \sin^2\varphi}$$

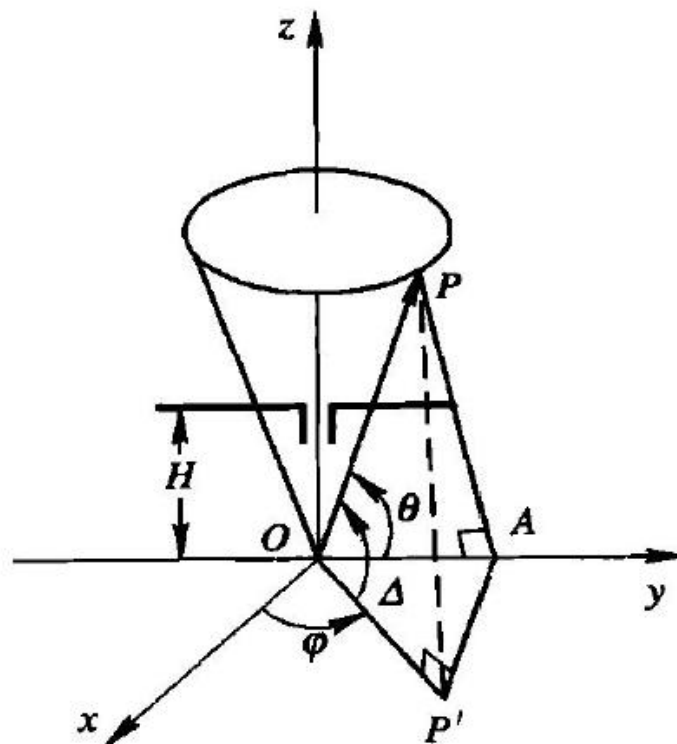
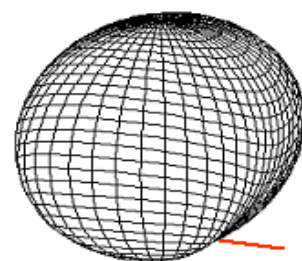
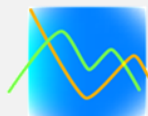


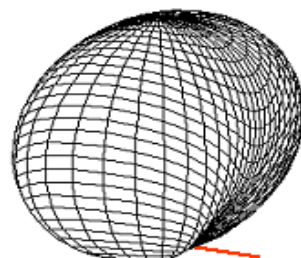
图 2-1-2 双极天线的坐标系

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

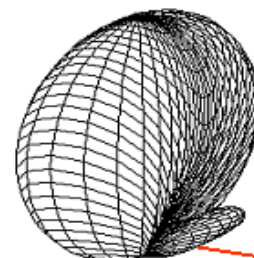
Δ 、 φ 表示射线仰角及方位角



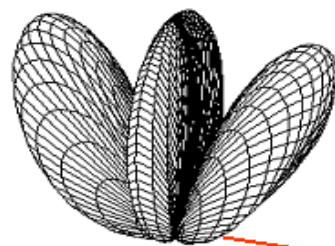
$$l = 0.25 \lambda$$



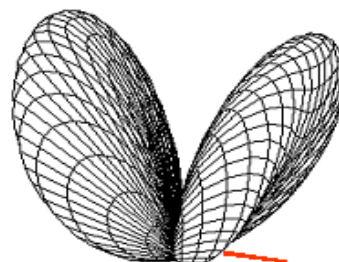
$$l = 0.5 \lambda$$



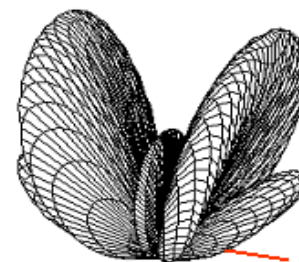
$$l = 0.65 \lambda$$



$$l = 0.75 \lambda$$

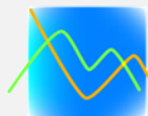


$$l = 1.0 \lambda$$

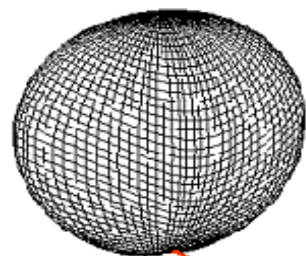


$$l = 1.2 \lambda$$

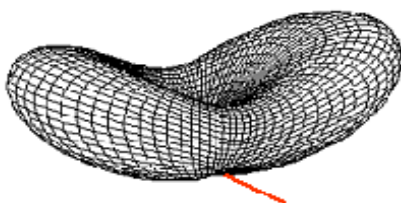
双极天线方向图随臂长的变化 ($H = \lambda / 4$)



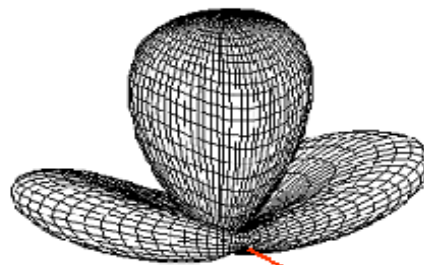
2.1.1 双极天线



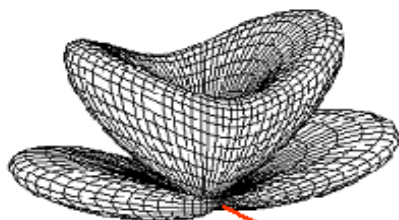
$$H = 0.25 \lambda$$



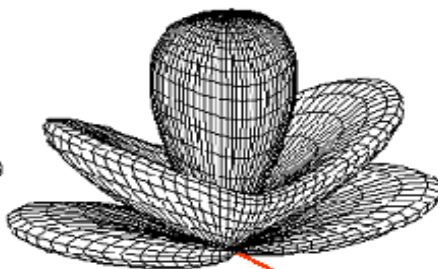
$$H = 0.5 \lambda$$



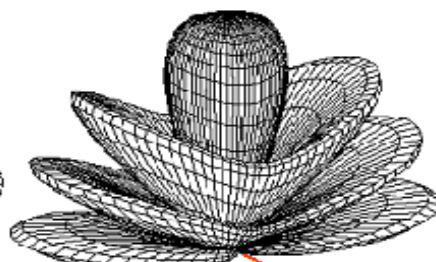
$$H = 0.75 \lambda$$



$$H = \lambda$$



$$H = 1.25 \lambda$$



$$H = 1.75 \lambda$$

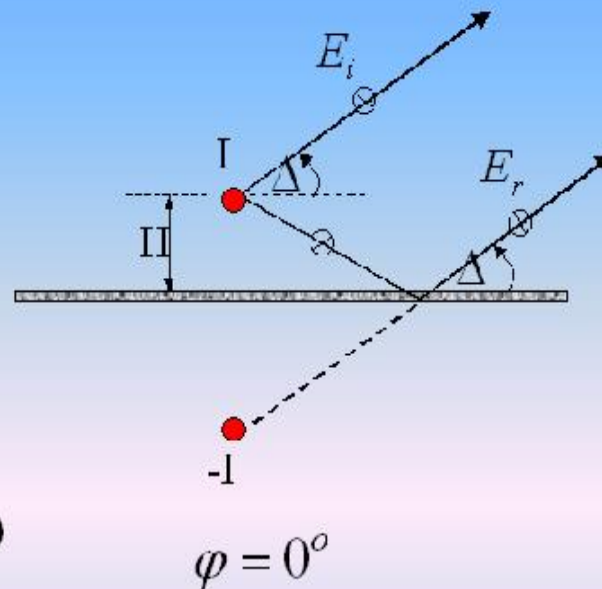
双极天线方向图随架高的变化 ($l = \lambda / 4$)

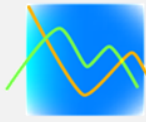


垂直平面 (XOZ) 平面

方向函数为:

$$f_g(\Delta) = 2 \sin(\beta H \sin \Delta)$$

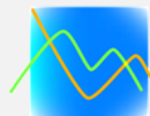




垂直平面方向性特点：

- 垂直平面方向性只与架高有关；
- 架高越高，波瓣越多，但沿地面方向总是零辐射方向； 地面上与镜像的天线行程差为零，反相。故为零
- 贴近地面的第一波瓣的最大辐射仰角与架高的关系：

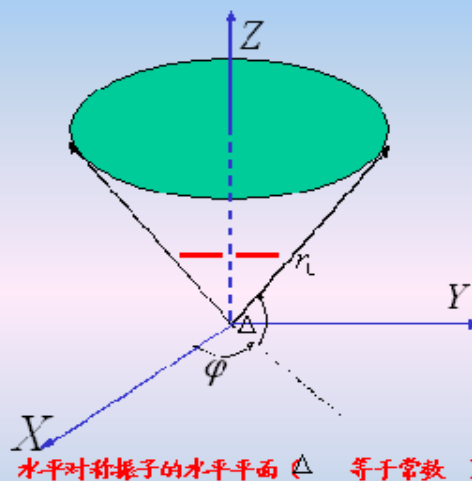
$$\Delta_{m1} = \arcsin \frac{\lambda}{4h}$$

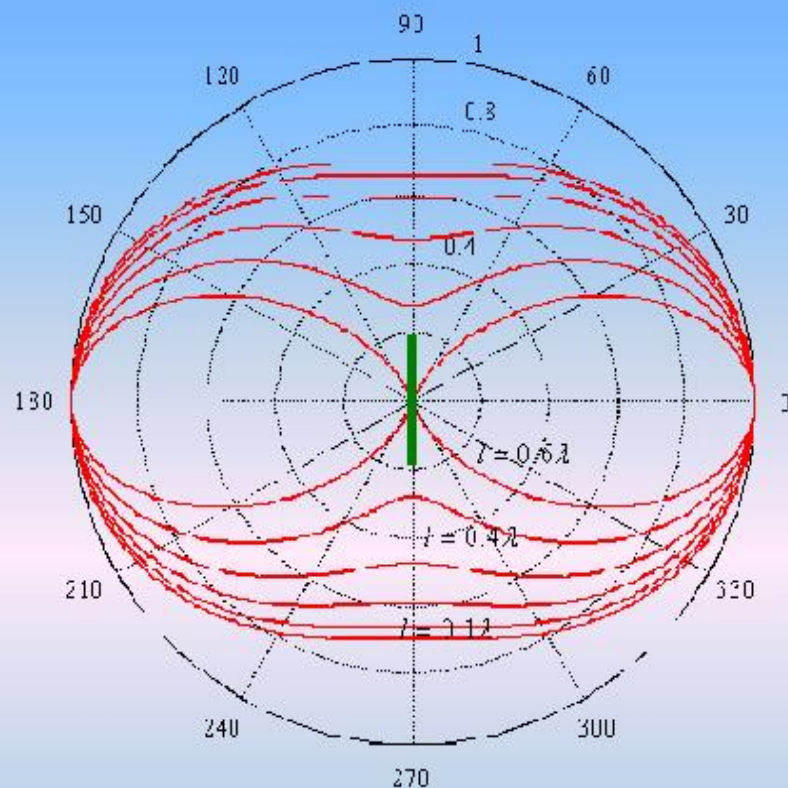
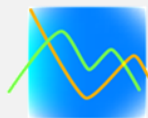


水平平面：仰角等于常数的平面。它的方向性与臂长 l 和仰角 Δ 有关。

方向函数：

$$\begin{aligned} f(\varphi, \Delta) &= f_0(\varphi, \Delta) \cdot f_g(\Delta) \\ &= \left| \frac{\cos(\beta l \cos \Delta \sin \varphi) - \cos \beta l}{\sqrt{1 - \cos^2 \Delta \sin^2 \varphi}} \right| \\ &\quad \cdot 2|\sin(\beta h \sin \Delta)| \end{aligned}$$

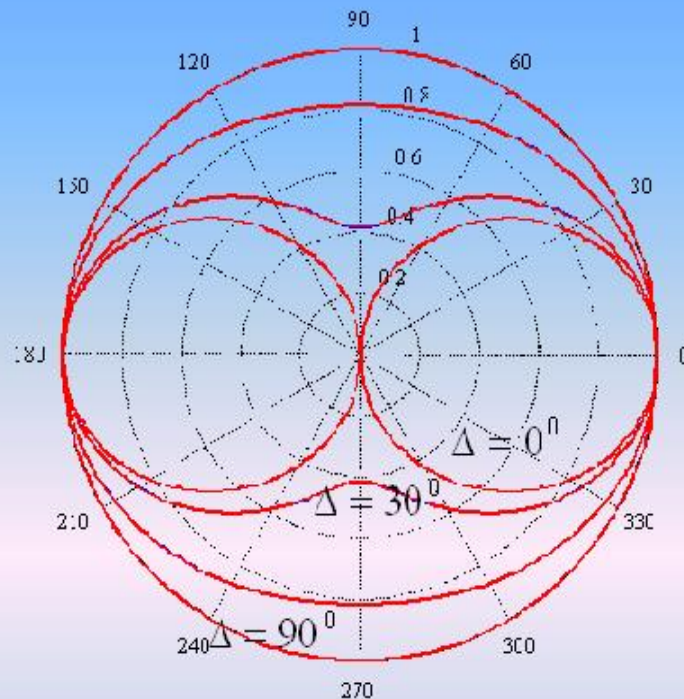




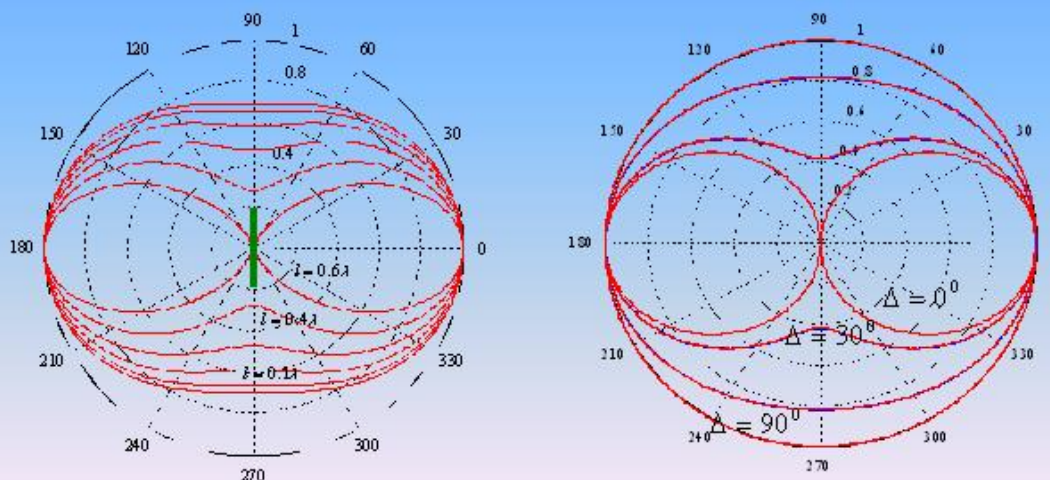
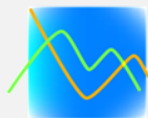
$\Delta = 45^\circ$ 时随臂长 l 变化的水平平面方向图



2.1.1 双极天线



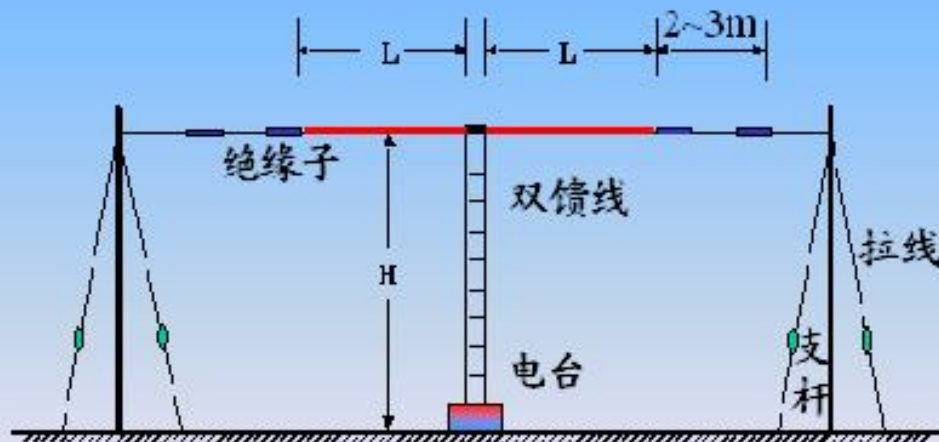
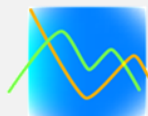
架高 $h=0.25\lambda$ 时，臂长 $l=0.25\lambda$ 时随仰角 Δ 变化的水平平面方向图



水平平面方向性特点:

1. 与仰角有关，仰角越大，方向性越不明显；
2. 与臂长有关。臂长越长，方向性越强；在波段内，为保持方向性不变，应满足如下条件：

$$l \leq 0.625\lambda$$



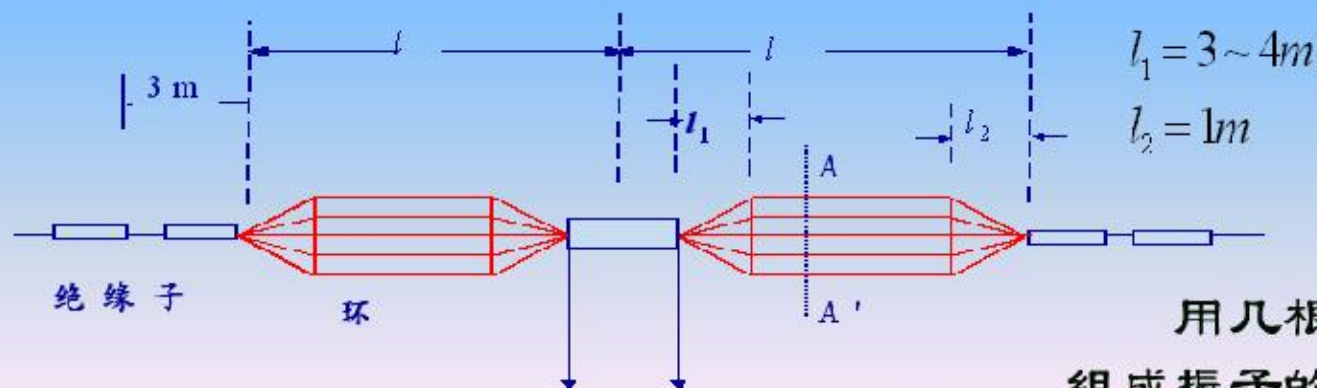
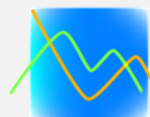
L: 臂长 H: 架高

双极天线

设计依据:

保证在工作频率范围内，天线的最大辐射方向不发生变动
保证在工作频率范围内，天线的增益不下降太多。

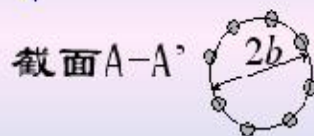
$$\underline{0.7\lambda_{\min} > l > 0.2\lambda_{\max}}$$



$$a = 1.5 \sim 2.5 \text{ mm}$$

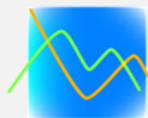
$$b = 0.5 \sim 1.5 \text{ m}$$

$$n = 6 \sim 8$$

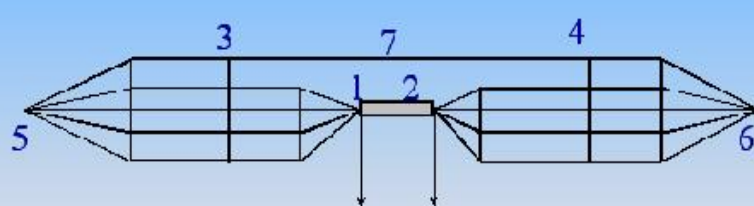


$$a_e = b \cdot n \sqrt{\frac{na}{b}}$$

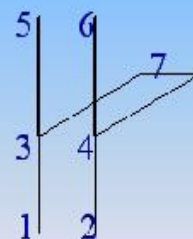
用几根导线排成圆柱形组成振子的两臂，这样既能有效地增加天线的等效直径，又能减轻天线重量，减少风的阻力，节约材料，这就是笼形天线。因特性阻抗较低，天线输入阻抗在波段内变化较平缓，故可以展宽使用的波段。它在固定的通信台站中应用较多。



分支笼形天线

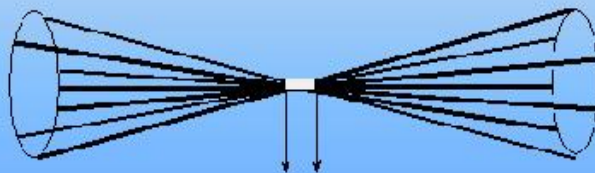


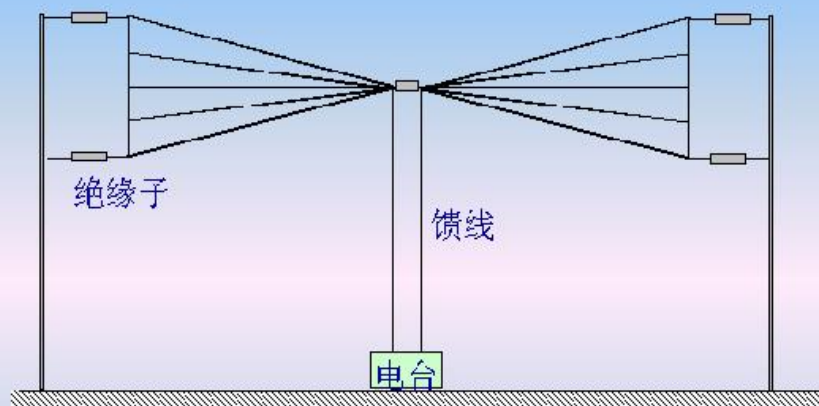
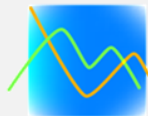
(a) 结构示意图



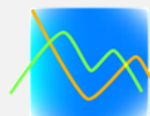
(b) 等效电路

笼形构造的双锥天线





扇形天线



2.1.3 V形对称振子

如果说对称振子可视为终端开路的平行双导线在离末端 h 远处两臂各向外掰开 90° 的结果, 那么 V 形振子就是令这一掰开角度适当小于 90° 形成的一种天线, 称“羊角天线”。V 形振子的最大辐射沿张角 γ 的角平分线方向。

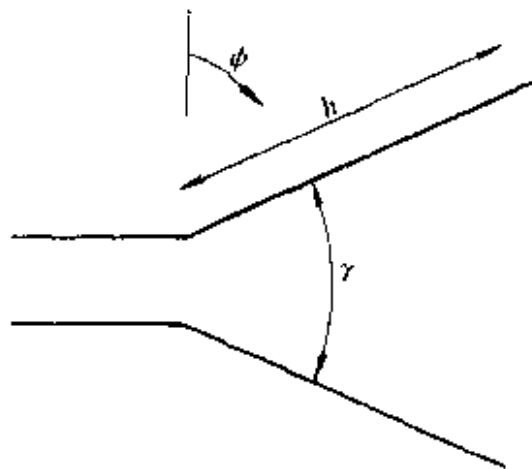
值得注意的是, 因张角 γ 不是平角, 故 V 形振子两臂所确定的平面是惟一的, 此平面 (就是图中的纸面) 为 E 面; 含最大辐射方向 $\phi = 90^\circ$ 且与 E 面垂直的是 H 面。在单臂的电长度 h/λ 给定的情况下, 适当调节张角 γ 可望方向系数最大化, 此时两臂间的夹角称为最佳张角 γ_{opt} 。

根据对矩量法计算结果的拟合, 最佳张角与单臂电长度 γ_{opt} (单位为度) 服从以下近似公式

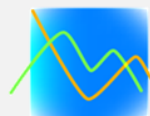
$$\gamma_{\text{opt}} = \begin{cases} 152 \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2 - 388 \left(\frac{h}{\lambda} \right) + 324 & 0.5 \leq \frac{h}{\lambda} < 1.5 \\ 11.5 \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2 - 70.5 \left(\frac{h}{\lambda} \right) + 162 & 1.5 \leq \frac{h}{\lambda} \leq 3.0 \end{cases}$$

对应的最大方向系数

$$D_{\text{max}} = 2.94 \frac{h}{\lambda} + 1.15$$

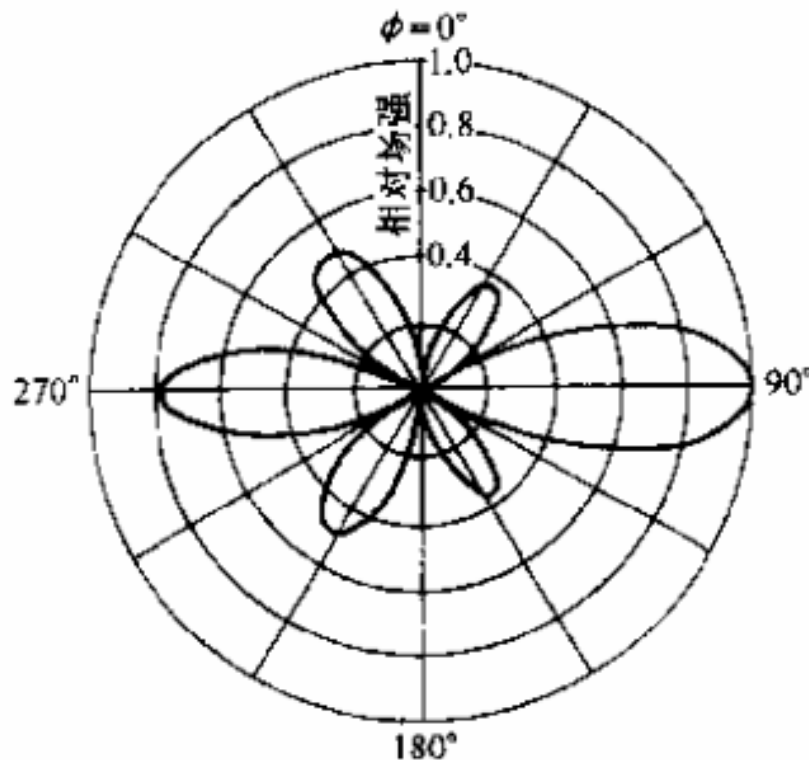


V 形振子示意图

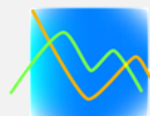


2.1.3 V形对称振子

经优化设计的 V 形振子明显比同等长度对称振子的方向系数大。有这样一个实例：
导线直径 $2a=0.001\lambda$ 、臂长 $h=0.75\lambda$ 的 V 形振子，取张角 $\gamma=118.5^\circ$ ，其 E 面方向图由图可见，前后比约为 2dB，就是说后向 ($\varphi=270^\circ$) 辐射比前向 ($\varphi=90^\circ$) 辐射弱 2dB。



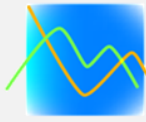
臂长 0.75λ 、张角 118.5°
时的方向图



该 V 形振子的方向系数 $D = 2.94 \times 0.75 + 1.15 = 3.36$ (合 5.26dB); 而与它同等长度 ($2h = 1.5\lambda$) 的对称振子的方向系数仅为 2.2 (合 3.4dB)。经优化设计的 V 形振子还有个优点, 即副瓣电平低于对应的对称振子。

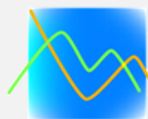
V 形振子的 H 面方向图不再是个圆, 因为张角 γ 不是平角, 几何结构上的旋转对称性已不复存在。

V 形振子一般比同等长度的对称振子的输入阻抗低。
上例中, V 形振子的输入阻抗为 $(106 + j17)\Omega$, 比由图查出来的同等长度 ($2h = 1.5\lambda$) 对称振子的输入阻抗稍低。



2.1.3 V形对称振子





国际编号 国内编号 图像载频(MHz)

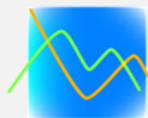
1 1频道 49.75
2 2频道 57.75
3 3频道 65.75
4 4频道 77.25
5 5频道 85.25
13 增补1频道 112.25
14 增补2频道 120.25
15 增补3频道 128.25
16 增补4频道 136.25
17 增补5频道 144.25
18 增补6频道 152.25
19 增补7频道 160.25
6 6频道 168.25
7 7频道 176.25
8 8频道 184.25
9 9频道 192.25
10 10频道 200.25
11 11频道 208.25
12 12频道 216.25
20 增补8频道 224.25
21 增补9频道 232.25
22 增补10频道 240.25
23 增补11频道 248.25
24 增补12频道 256.25
25 增补13频道 264.25

26 增补14频道 272.25
27 增补15频道 280.25
28 增补16频道 288.25
29 增补17频道 296.25
30 增补18频道 304.25
31 增补19频道 312.25
32 增补20频道 320.25
33 增补21频道 328.25
34 增补22频道 336.25
35 增补23频道 344.25
36 增补24频道 352.25
37 增补25频道 360.25
38 增补26频道 368.25
39 增补27频道 376.25
40 增补28频道 384.25
41 增补29频道 392.25
42 增补30频道 400.25
43 增补31频道 408.25
44 增补32频道 416.25
45 增补33频道 424.25
46 增补34频道 432.25
47 增补35频道 440.25
48 增补36频道 448.25
49 增补37频道 456.25

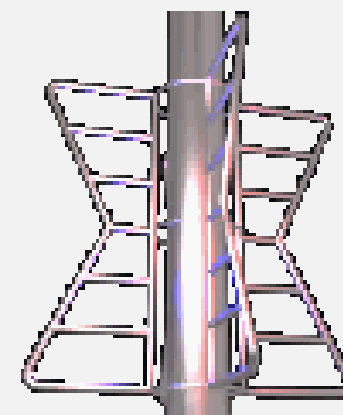
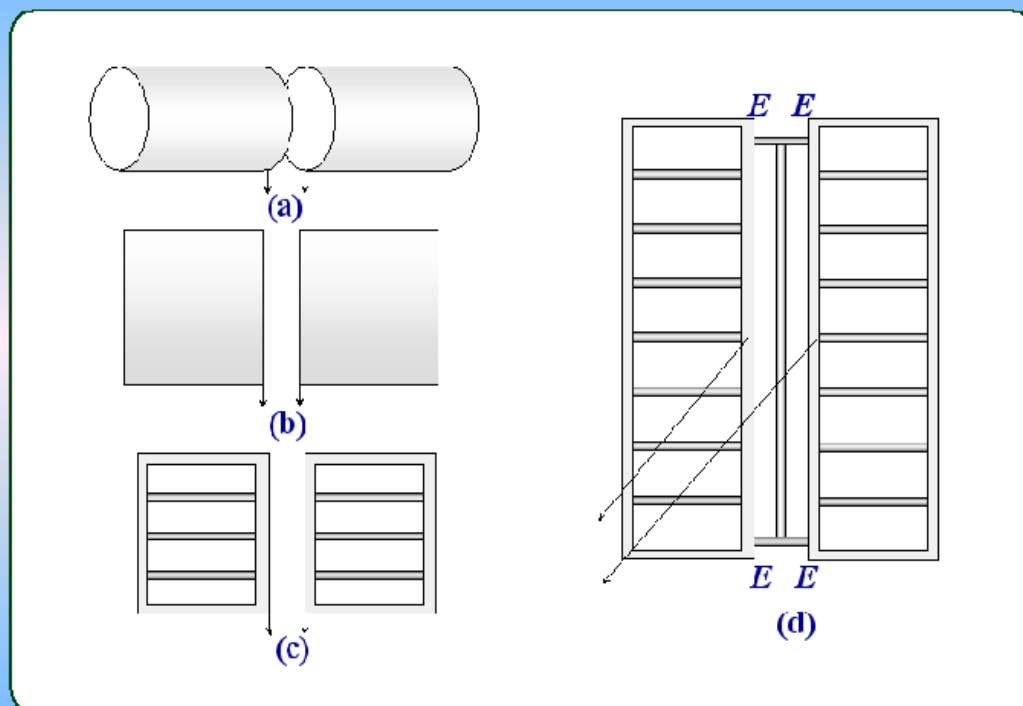
50 13频道 471.25
51 14频道 479.25
52 15频道 487.25
53 16频道 495.25
54 17频道 503.25
55 18频道 511.25
56 19频道 519.25
57 20频道 527.25
58 21频道 535.25
59 22频道 543.25
60 23频道 551.25
61 24频道 559.25
62 24+1频道 567.25
63 24+2频道 575.25
64 24+3频道 583.25
65 24+4频道 591.25
66 24+5频道 599.25
67 25频道 607.25
68 26频道 615.25
69 27频道 623.25
70 28频道 631.25
71 29频道 639.25
72 30频道 647.25
73 31频道 655.25
74 32频道 663.25

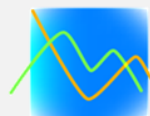
75 33频道 671.25
76 34频道 679.25
77 35频道 687.25
78 36频道 695.25
79 37频道 703.25
80 38频道 711.25
81 39频道 719.25
82 40频道 727.25
83 41频道 735.25
84 42频道 743.25
85 43频道 751.25
86 44频道 759.25
87 45频道 767.25
88 46频道 775.25
89 47频道 783.25
90 48频道 791.25
91 49频道 799.25
92 50频道 807.25
93 51频道 815.25
94 52频道 823.25
95 53频道 831.25
96 54频道 839.25
97 55频道 847.25
98 56频道 855.25

有线电视频道

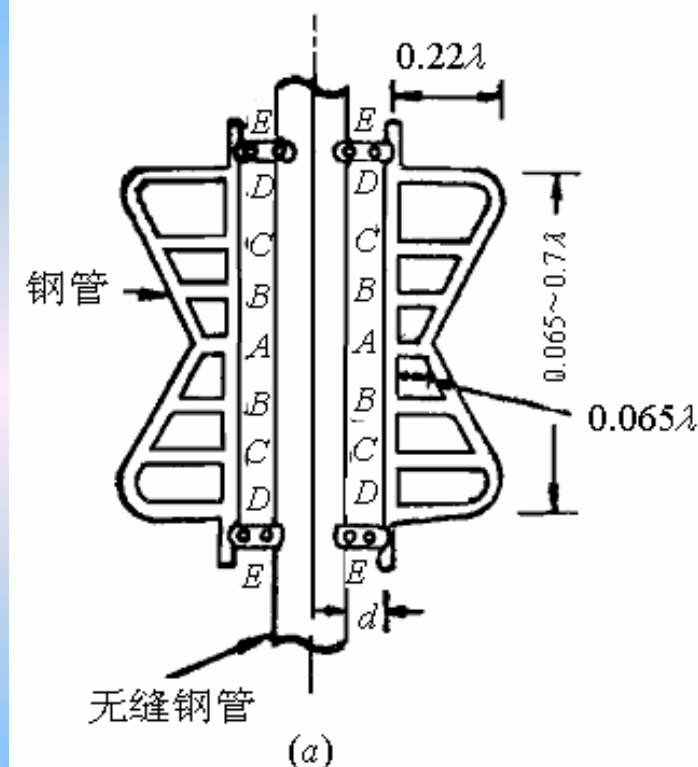


蝙蝠翼天线的演变过程





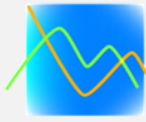
蝙蝠翼天线



蝙蝠翼天线常用作电视发射天线。

优点：

- (1) 频带很宽
- (2) 不用绝缘子，可很牢固地固定在支柱上；
- (3) 功率容量大。



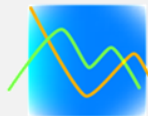
2.2 直立天线

主要用在长、中、短波、
超短波通信

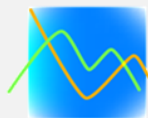


长波 授时 天线

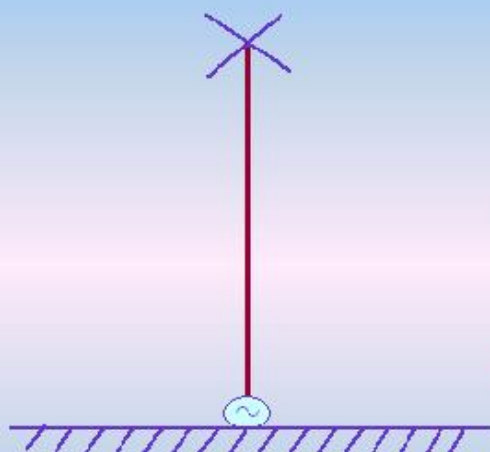
利用长波进行时间频率传递与校准



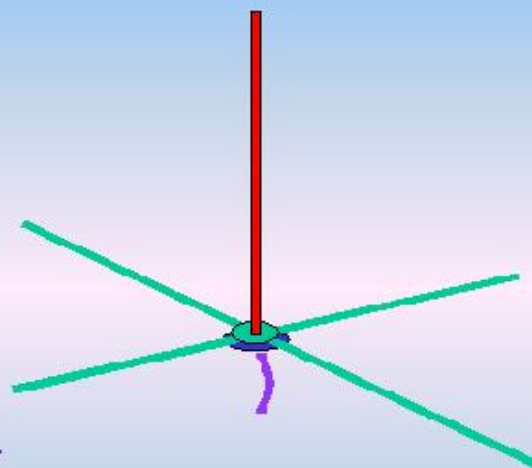
中波广播天线



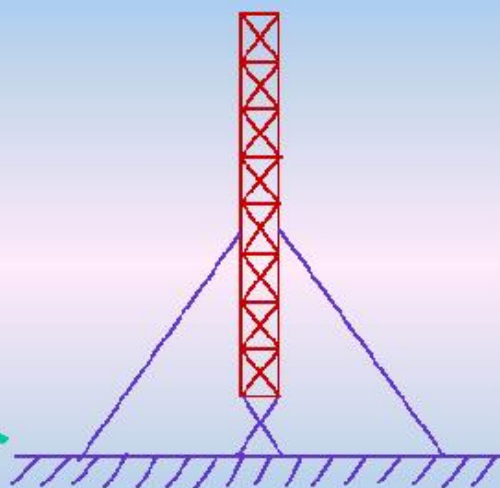
2.2 直立天线



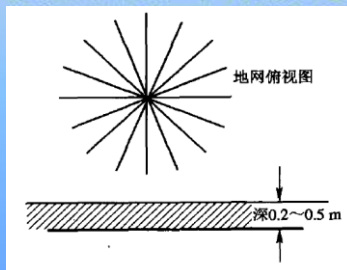
鞭状天线

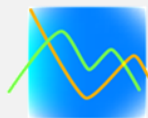


带辐射状金属地
线棒的单极天线

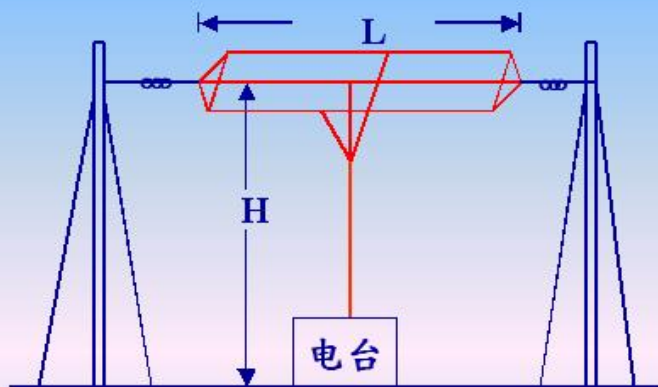


铁塔天线

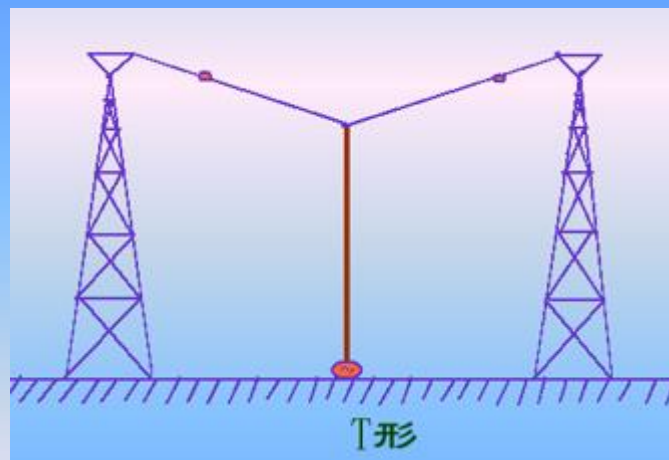




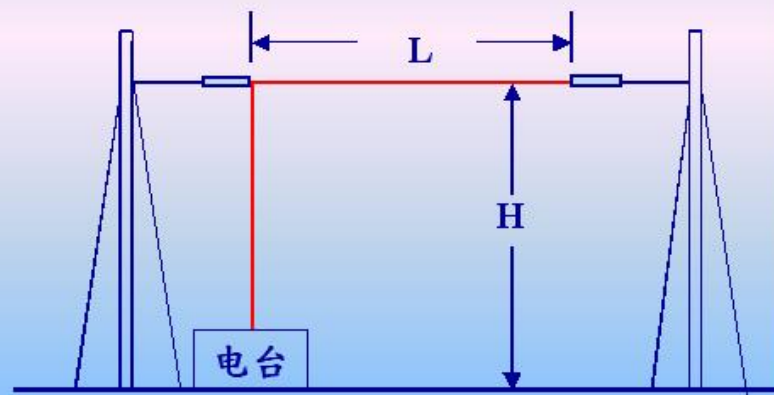
2.2 直立天线



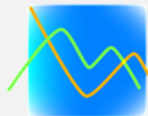
宽T形天线



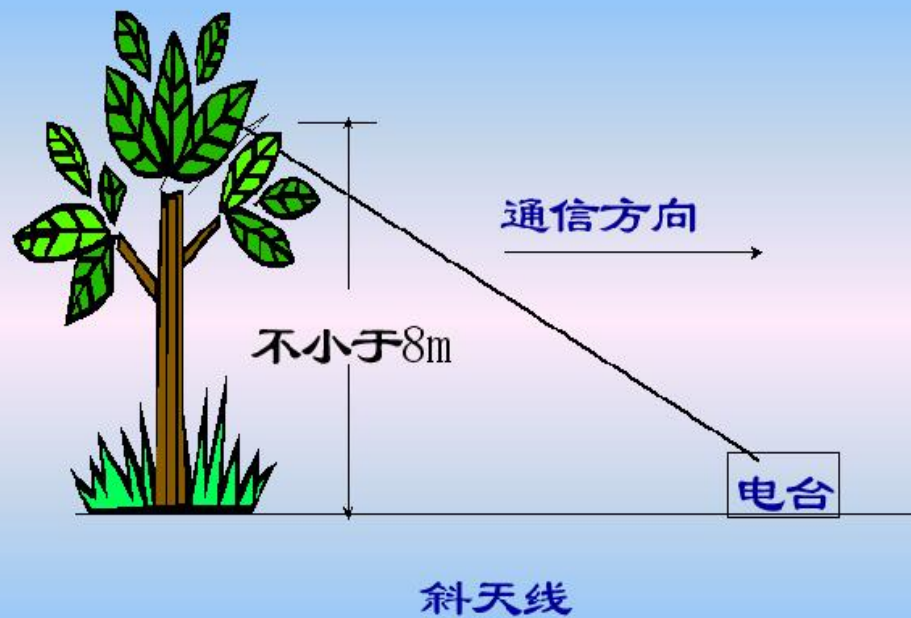
T形

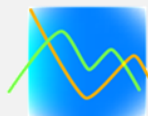


Γ天线 (倒L天线)



2.2 直立天线

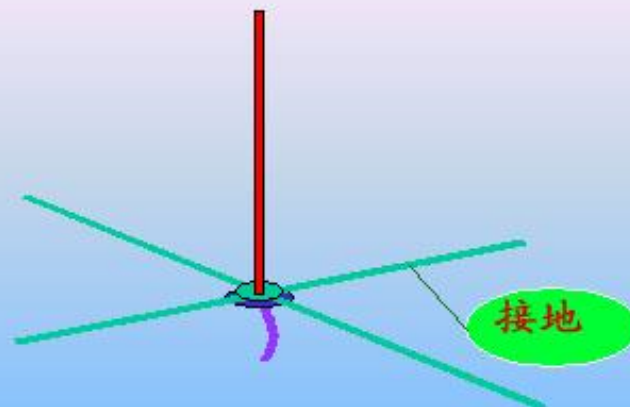
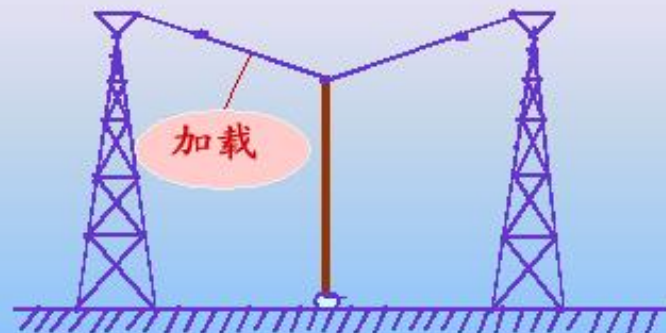


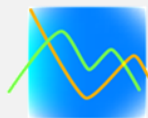


效率及增益

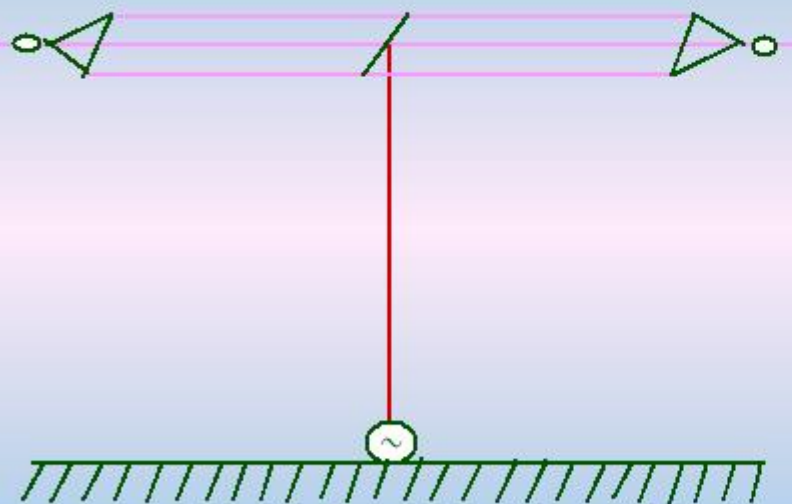
当天线高度低于 $\lambda/4$ 时，辐射电阻较低，损耗电阻不能忽略，如果没有一个良好的接地系统，其效率不超过50%。

提高效率的方法：**加载和接地**

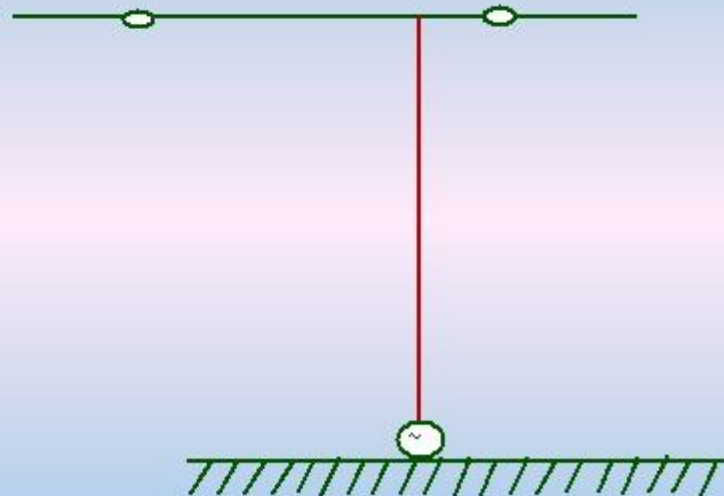




容性加载（加顶负载）



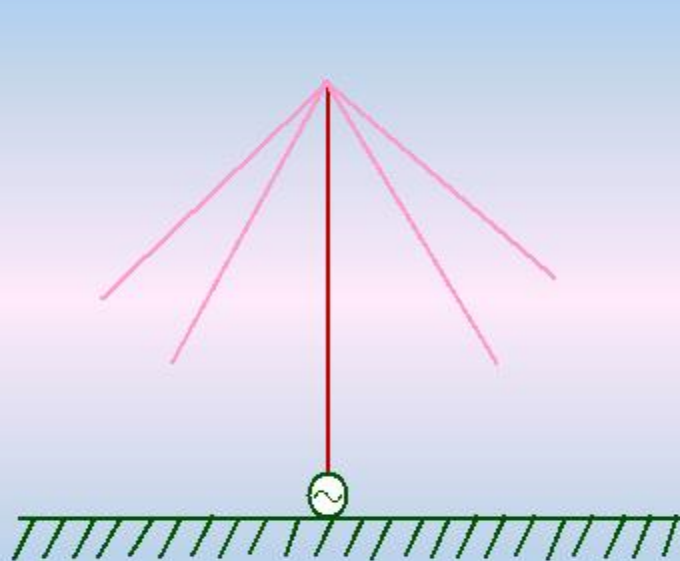
T形加载



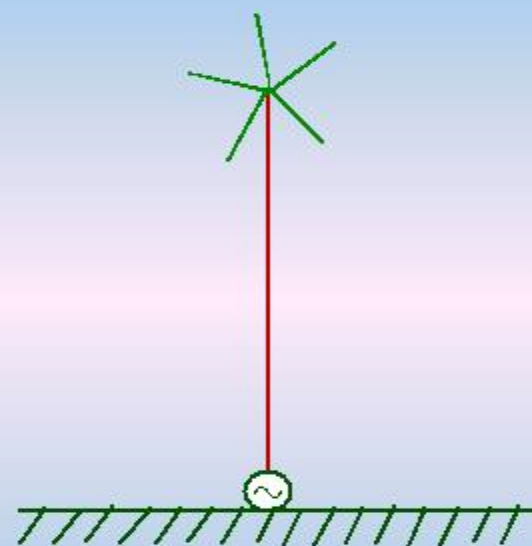
倒T形加载



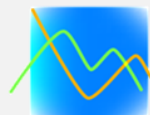
容性加载



伞形加载



带辐射叶
的鞭天线



容性加载（加顶负载）的计算公式：

$$Z_{ca} \operatorname{ctg} \beta h' = \frac{1}{\omega C_a} \quad h' = \frac{1}{\beta} \operatorname{arccotg} \frac{1}{Z_{ca} \omega C_a}$$

$$I_z = \frac{I_0}{\sin \beta h_0} \sin \beta (h_0 - z)$$

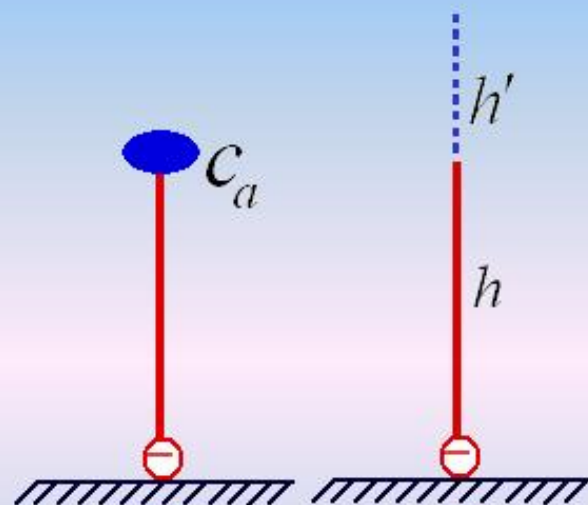
$$X_{in} = -Z_{ca} \operatorname{ctg} (h + h') = -Z_{ca} \operatorname{ctg} \beta h_0$$

$$h_e = \frac{1}{I_0} \int I_z dz = \frac{1}{\sin \beta h_0} \int_0^h \sin \beta (h_0 - z) dz$$

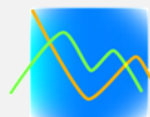
$$= \frac{2 \sin \beta \left(h_0 - \frac{h}{2} \right) \sin \left(\frac{\beta h}{2} \right)}{\beta \sin \beta h_0}$$

当 h_0 / λ 很小时，上式简化为 $h_e \approx h \left(1 - \frac{h}{2 h_0} \right)$

可见，加顶负载可以提高有效高度，进而提高辐射效率。



将 C_a 等效为一线段 h'



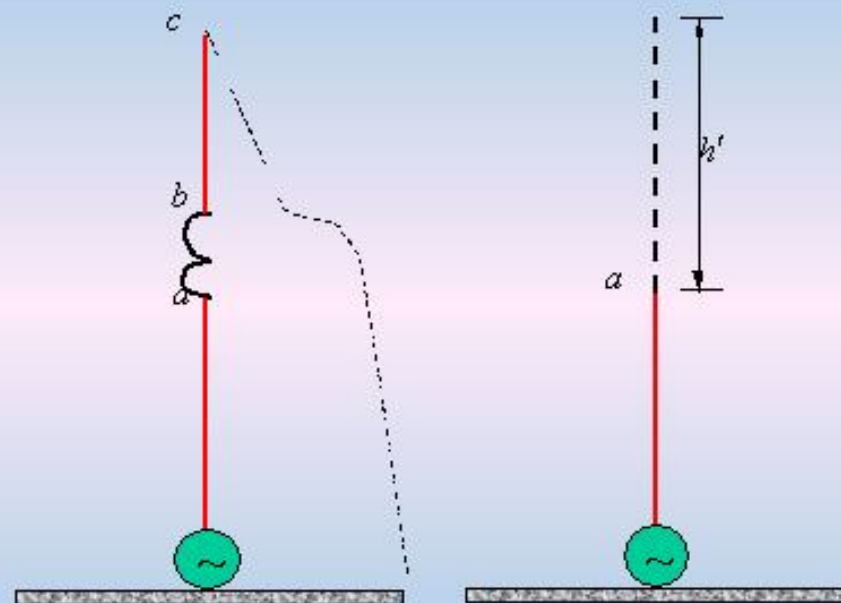
感性加载（加电感线圈）

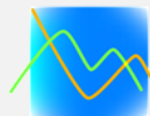
$$X_A = X_b = -Z_{cA} \operatorname{ctg} \beta h_{bc}$$

$$\begin{aligned} X_a &= X_b + X_L \\ &= -Z_{cA} \operatorname{ctg} \beta h_{bc} + X_L \\ &= -Z_{cA} \operatorname{ctg} \beta h' \end{aligned}$$

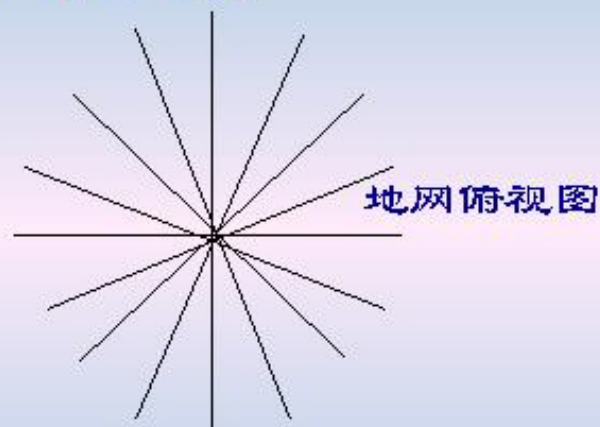
$$h' = \frac{1}{\beta} \operatorname{arctg} \left(-\frac{X_A}{Z_{cA}} \right)$$

$$h_e = \frac{1}{\sin \beta(h+h')} \left[\int_0^h \sin \beta(h_0 - z) dz + \frac{1}{2} h_{bc} \sin \beta h_{bc} \right]$$

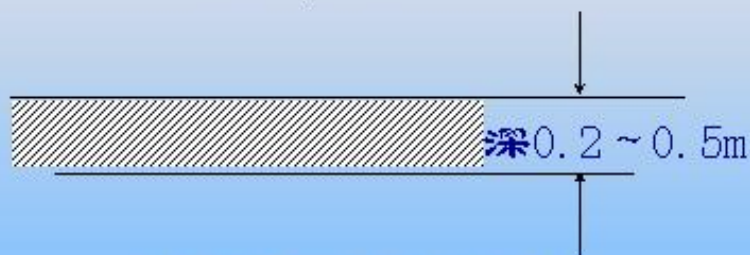




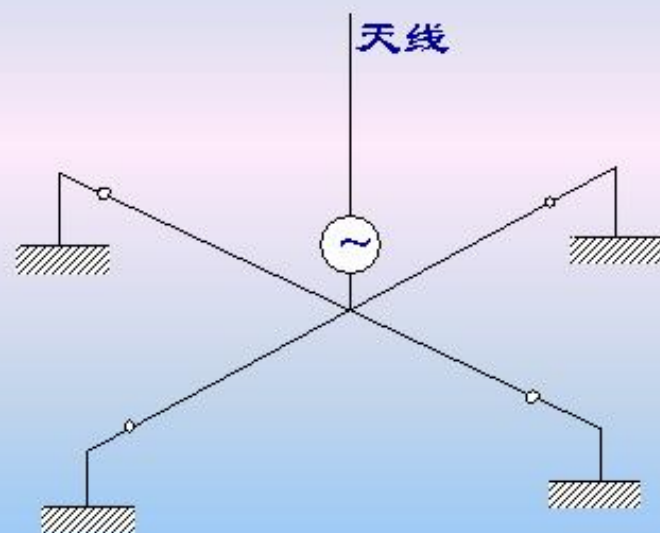
接地是一种降低损耗电阻的有效方法。
可以通过铺设地网来提高地面的电导率，从而降低损耗电阻，达到提高直立天线辐射效率的目的。



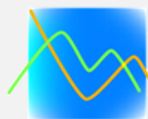
地网俯视图



鞭状天线地线的埋设



平衡器架设



将导线绕制成螺旋形线圈而构成的天线称为螺旋天线。通常它带有金属接地板（或接地网栅），由同轴线馈电，同轴线的内导体与螺旋线相接，外导体与接地板相连，其结构如图所示。螺旋天线是常用的圆极化天线。

螺旋天线的参数有：

螺旋直径 $d=2b$ ；

螺距 s ；

圈数 N ；

每圈的长度 c ；

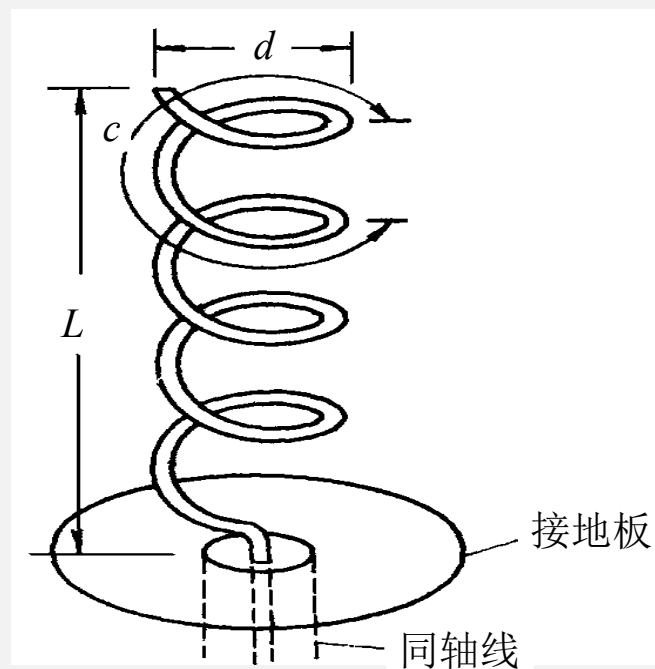
螺距角 Δ ；

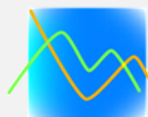
轴向长度 L 。

$$c^2 = s^2 + (\pi d)^2$$

$$\Delta = \arctan \frac{s}{\pi d}$$

$$L = Ns$$



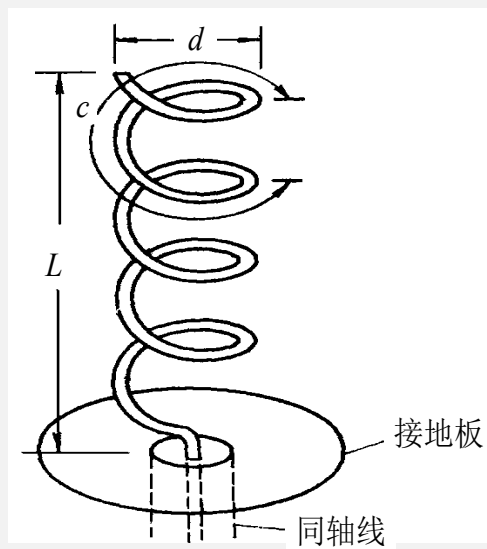


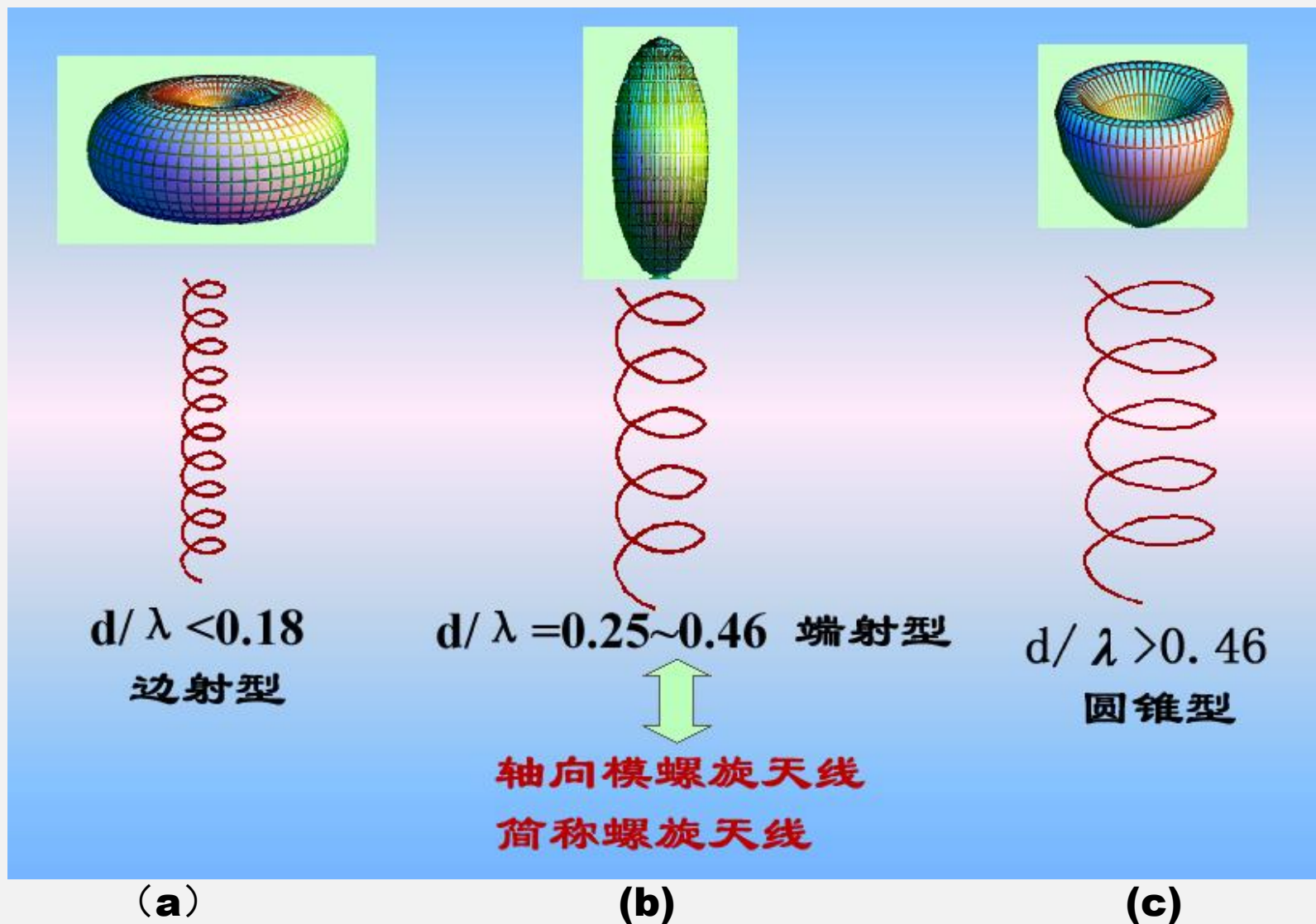
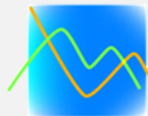
螺旋天线的辐射特性与螺旋的直径有密切关系：

① 当 $d/\lambda < 0.18$ 时，天线的最大辐射方向在与螺旋轴线垂直的平面内，称为法向模式，此时天线称为**法向模式天线**；

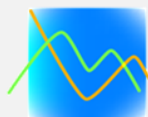
② 当 $d/\lambda \approx 0.25 \sim 0.46$ 时，即螺旋天线一圈的长度 c 在一个波长左右的时候，天线的辐射方向在天线的轴线方向，此时天线称为**轴向模式天线**。

③ 当 $d/\lambda > 0.46$ 时，天线的最大辐射方向偏离轴线分裂成两个方向，方向图呈**圆锥形状**。





螺旋天线的辐射特性与螺旋的直径的关系



法向模螺旋天线

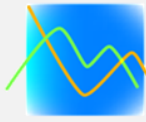
由于法向模螺旋天线的电尺寸较小，可以等效为电基本振子与一小环的辐射场叠加，小环上的电流振幅相等，相位相同，可以用磁基本振子来分析。

N圈螺旋天线的辐射场为

$$E = \frac{N \omega u_0 I}{4\pi} \cdot \frac{e^{-j\beta r}}{r} (\hat{\theta} js + \hat{\phi} k \pi b^2) \sin \theta$$

由于 E_θ 和 E_ϕ 的相位差为 $\pi/2$ ，所以法向模螺旋天线的辐射场是椭圆极化波，呈边射型，方向图呈“8”字形，只有当 $E_\theta = E_\phi$ 即 $s = k\pi b^2$ 时，螺旋天线辐射圆极化波。

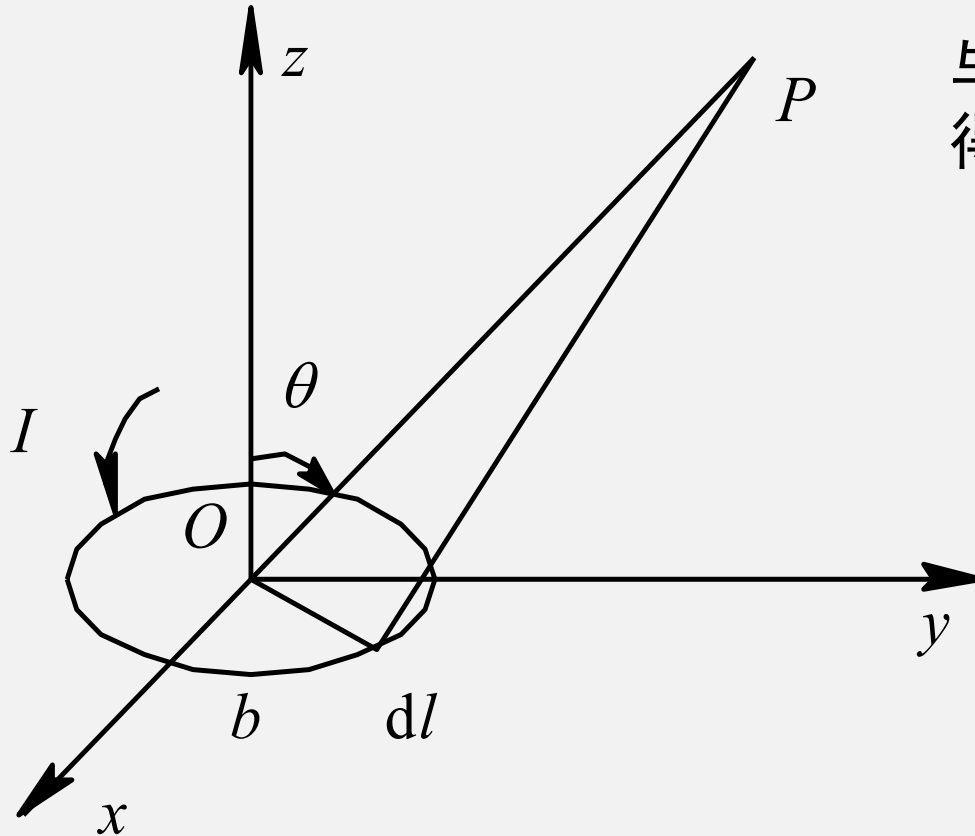
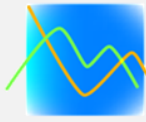
法向模螺旋天线的辐射效率和增益都较低，主要用于超短波手持式通信机。



2.3 环形天线

小环天线主要用于测向及广播接收

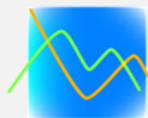
大环天线应用于广播和通信中



与电基本振子做相同的近似
得磁基本振子的远区场为：

$$E_{\varphi} = -j \frac{I_m l}{2r\lambda} \sin \theta e^{-jkr}$$

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

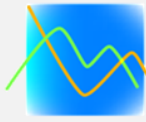


小环天线相当于**带有少量辐射的电感器**，辐射电阻很小，小于导线的损耗电阻。通常作**接收天线**。

N匝小环的辐射电阻是单匝时的 N^2 倍。辐射效率随着匝数增高而增高。多匝小环电尺寸小（绕制导线总长度 $<l/2$,通常为 $l/4$ ）、较隐蔽、相对尺寸而言增益较高，在2-300MHz频段内使用。

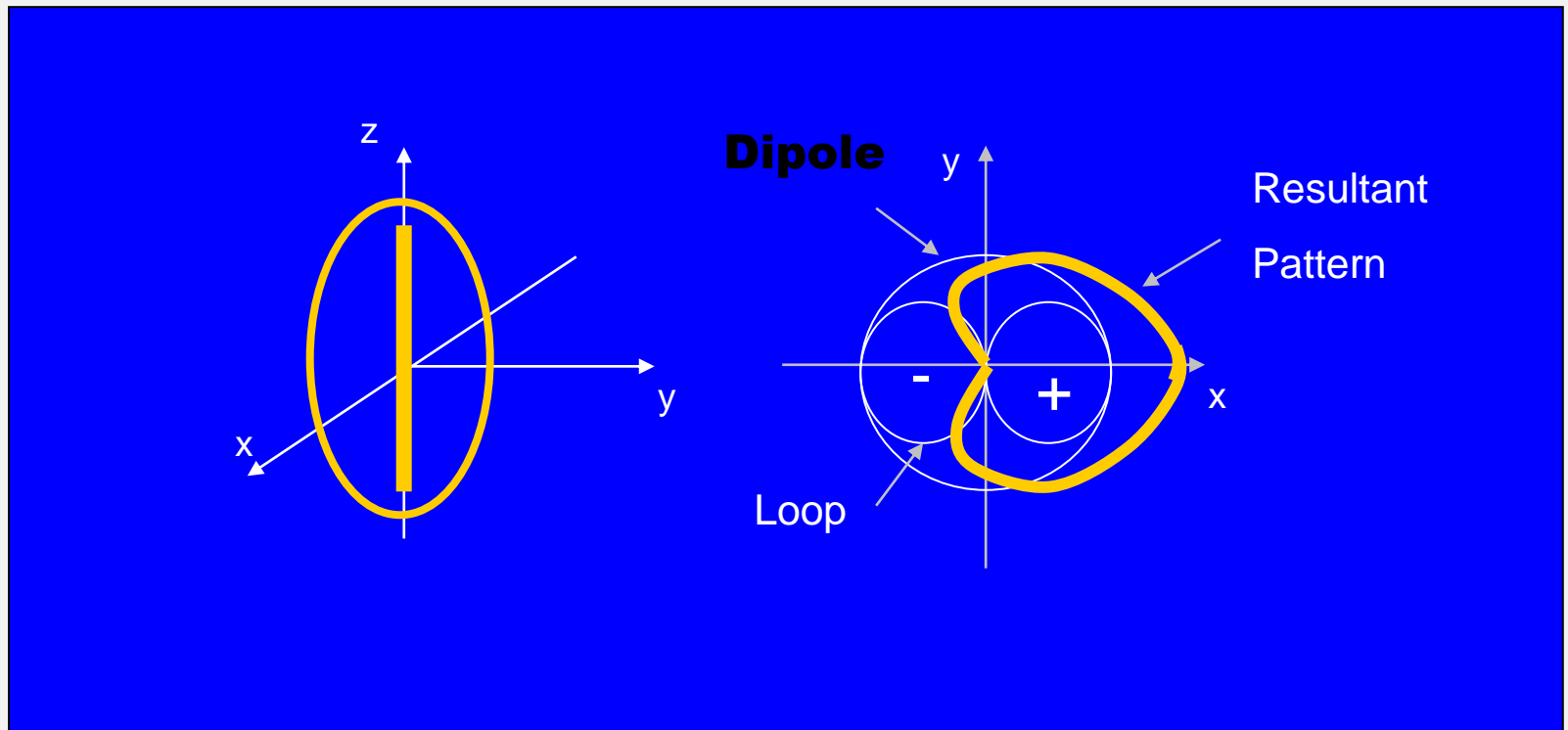
还可以在环线内插入**高磁导率铁氧体磁芯**，进一步提高辐射电阻。

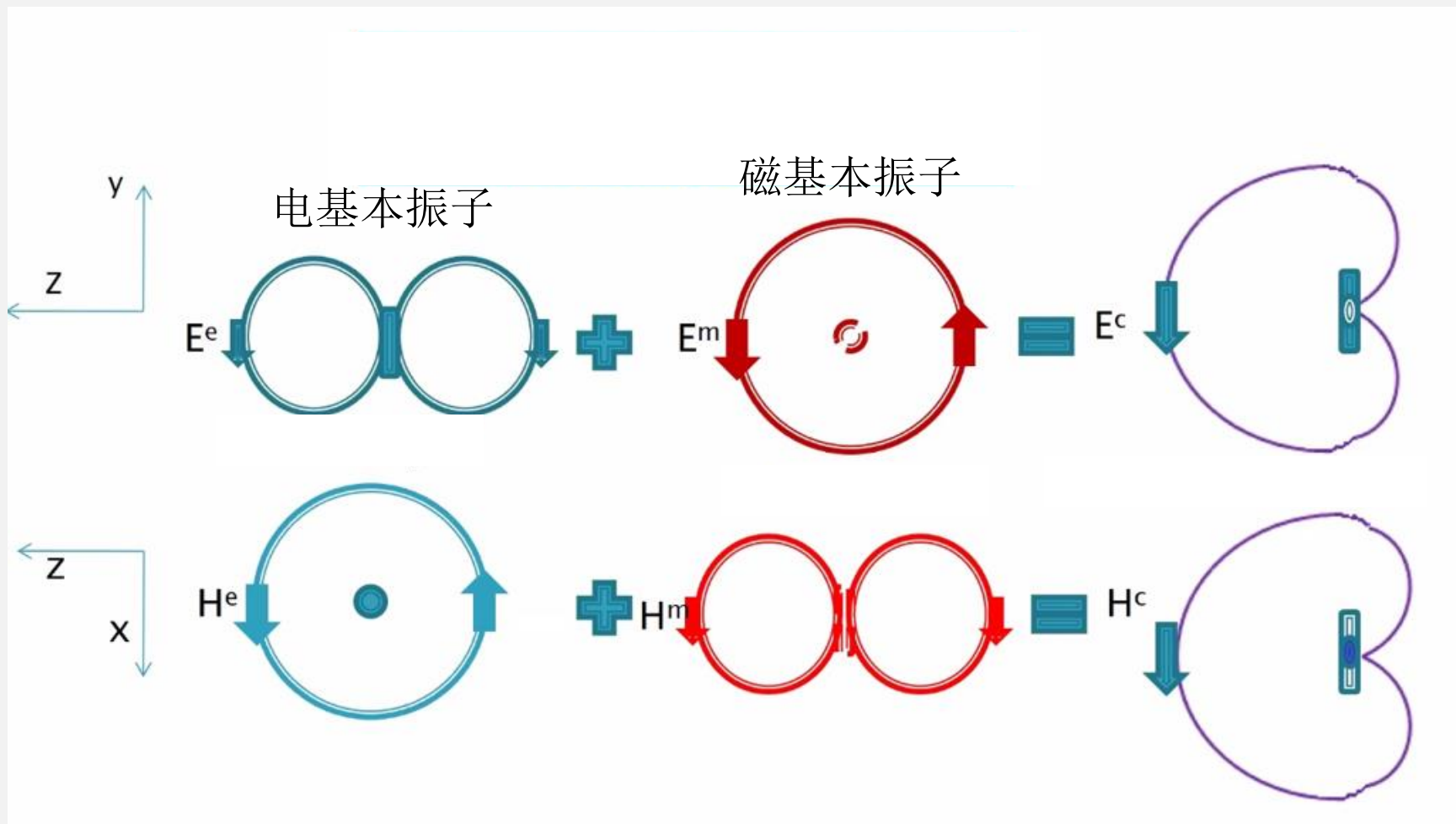
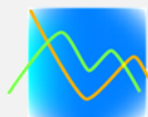
$$R'_r = \left(\frac{\mu_e}{\mu_o} \right)^2 R_r$$



小环天线的应用---测向

与电基本振子构成测向器

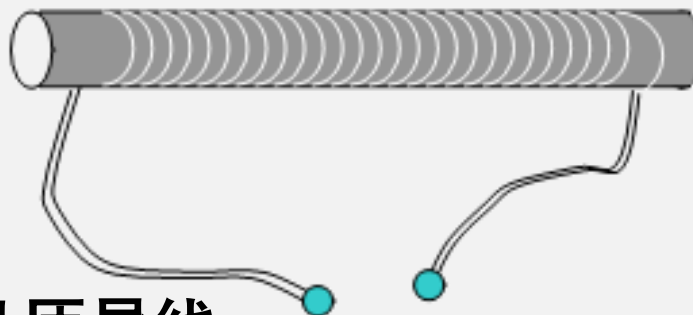






磁棒天线

Multiple loop antenna wound
around a ferrite core

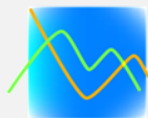


小型化： 在小铁氧体棒上绕几匝导线。

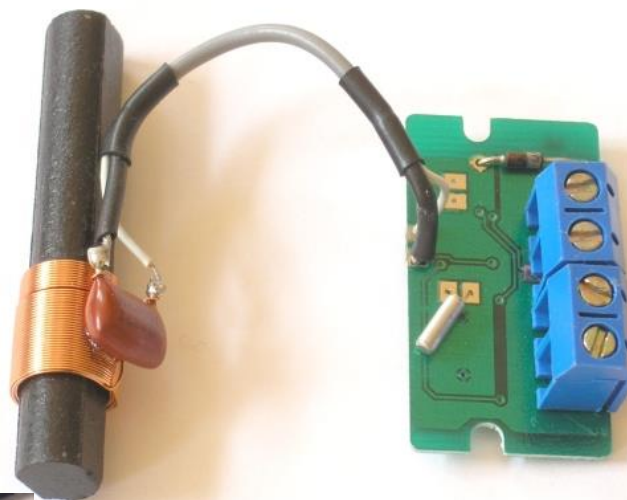
天线、电感（与调谐电容并联构成调谐回路）

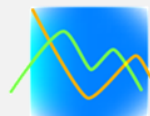
匝数不多，**损耗小**。

袖珍收音机中中波、短波天线

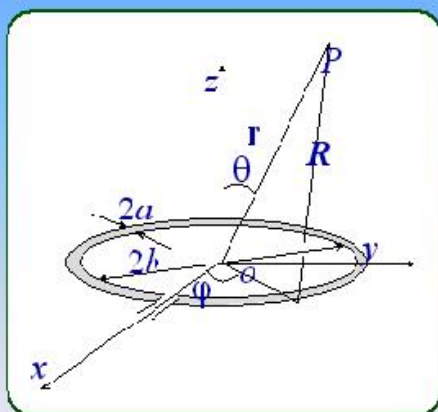


2.3.1 小环天线

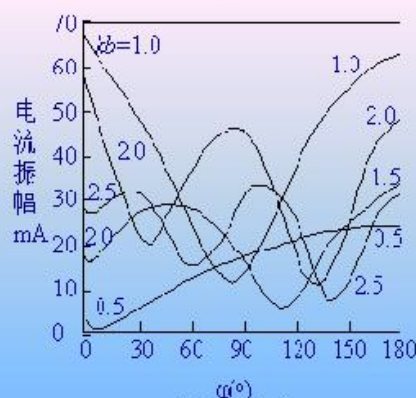
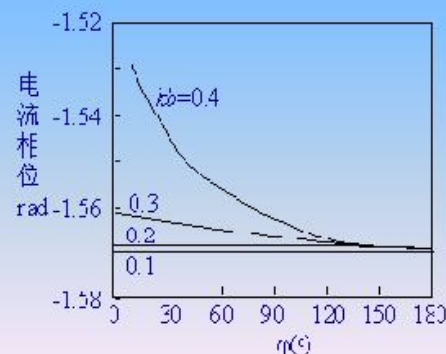
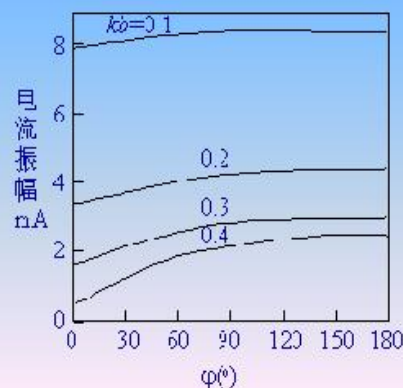




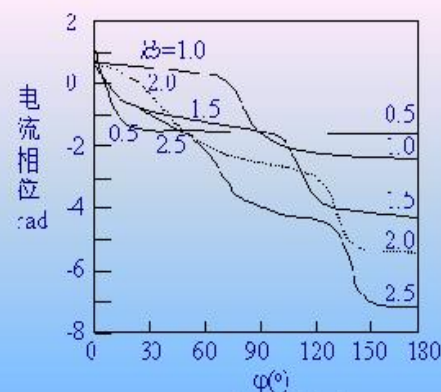
2.3.2 电流非均匀分布的大环天线



J. E. Storer分析单匝圆环上的电流振幅及相位分布如右图，得：
当 $kb=0.1$ 时电流近似均匀分布，
当 $kb>0.2$ 时就不能认为是小环了。
当 $kb=1$ 即环的周长为一个波长时，
在 $\phi=0^\circ$ 和 180° 为电流波腹点，在
 $\phi=90^\circ$ 和 270° 为电流波节点，即为驻波分布。

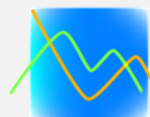


(a) 振幅分布



(b) 相位分布

圆环天线的电流分布

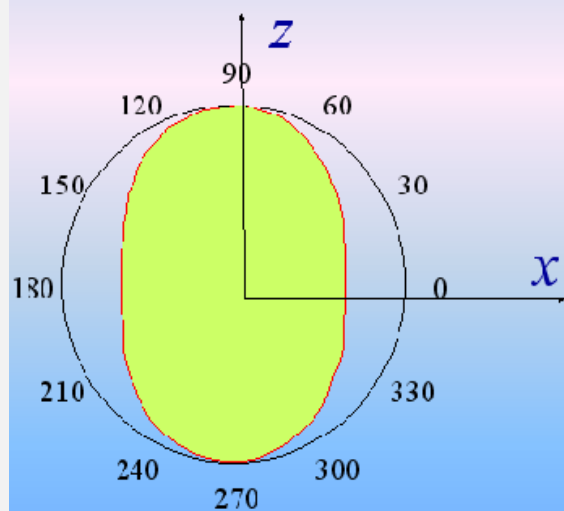


环的周长为一个波长的驻波环的方向性

电流分布 $I_\phi = I_m \cos \phi'$

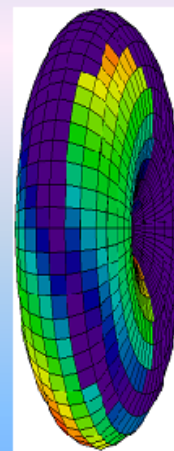
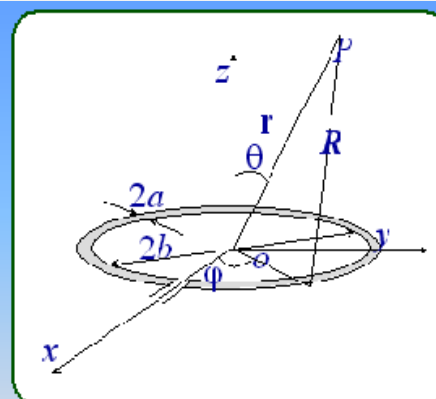
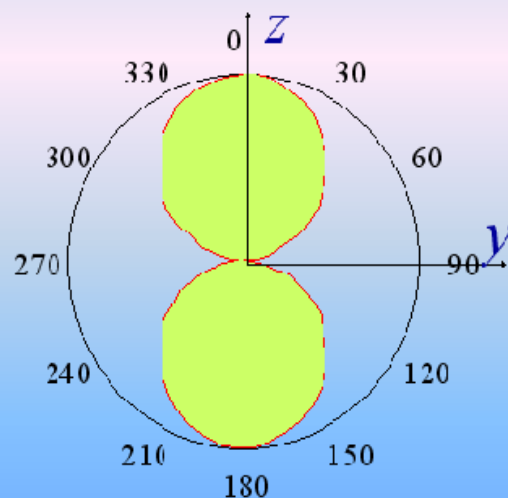
XZ平面方向函数

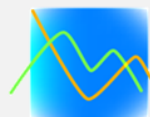
$$f_\phi(\theta) = J_0(\sin \theta) - J_2(\sin \theta)$$



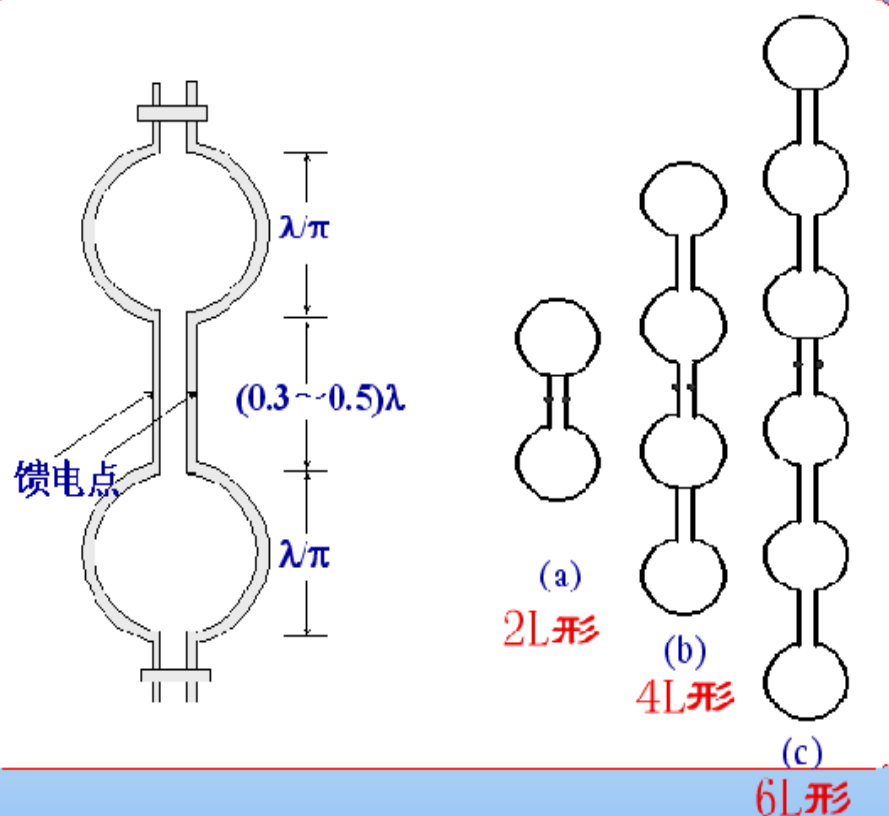
YZ平面方向函数

$$f_\theta(\theta) = \cos \theta [J_0(\sin \theta) + J_2(\sin \theta)]$$





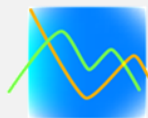
双环天线



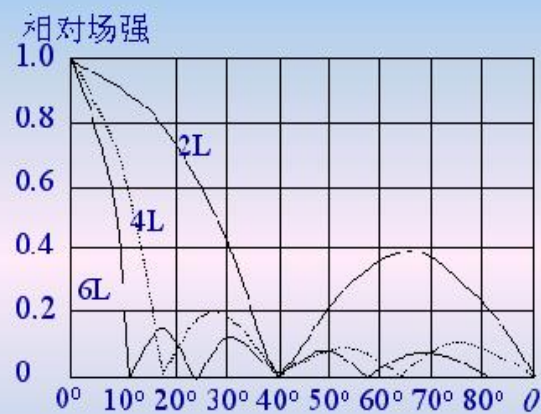
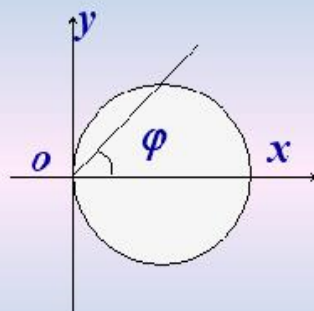
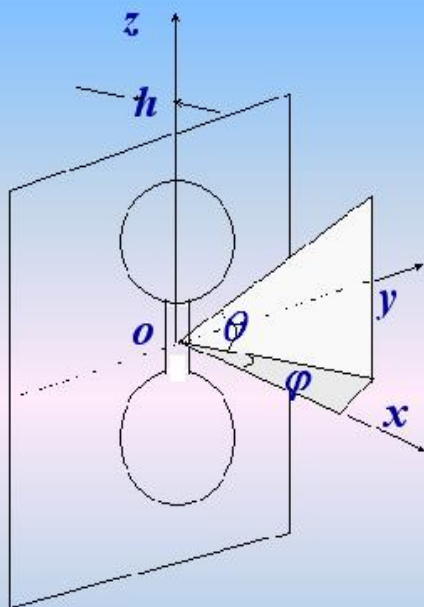
双环天线阵

双环天线的优点：

- (1) 馈电简单，馈电点少，多环天线可以只有两个馈电点；
- (2) 阻抗具有宽频带特性；
- (3) 增益高，可通过反射板来增加增益；
- (4) 可利用多面组合得到任意的水平平面方向图。

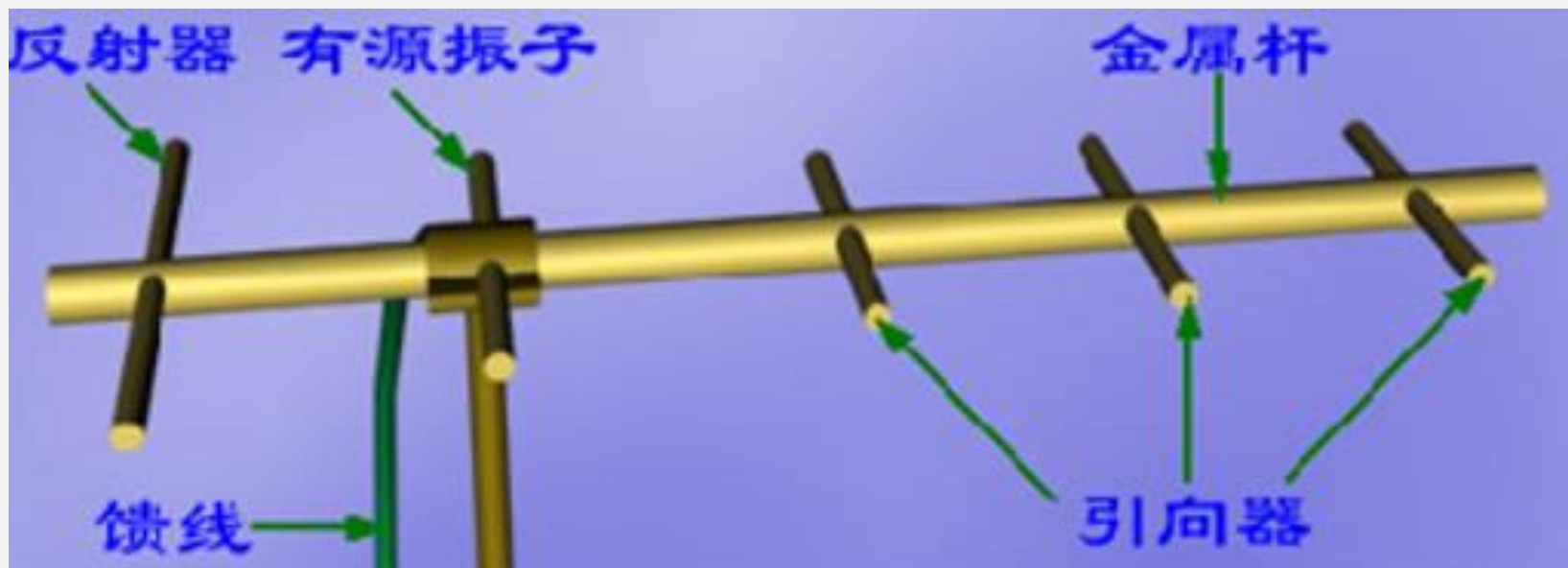


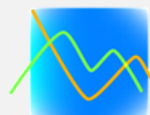
双环天线的方向性





引向天线 (八木-宇田天线)





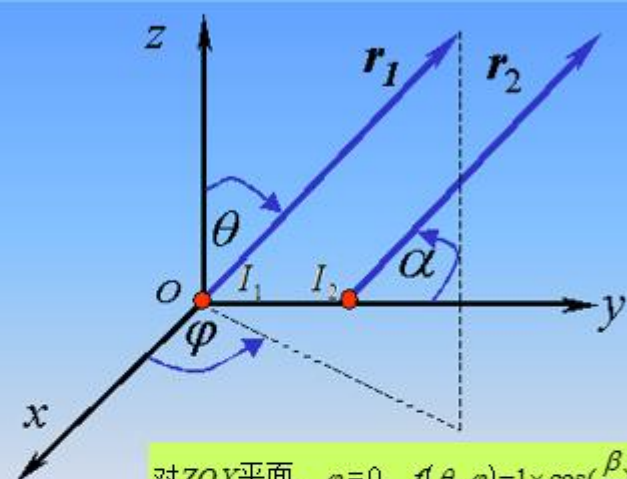
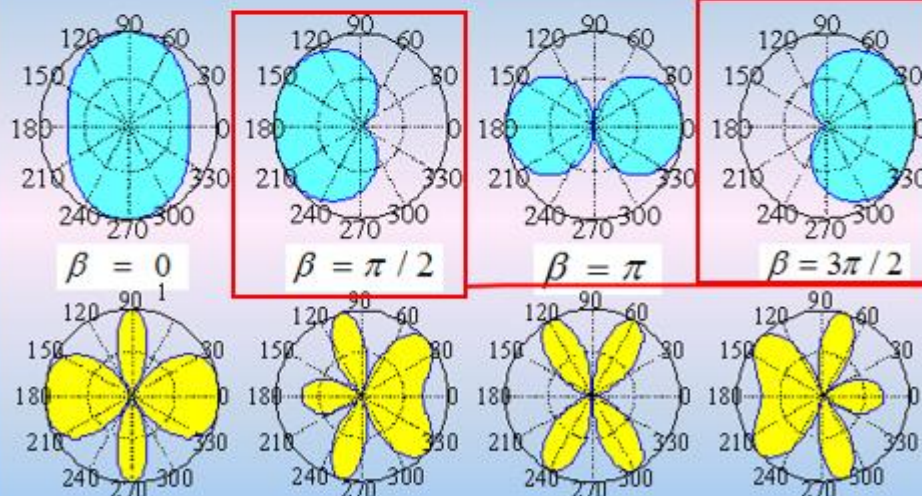
2.4.1 引向天线的工作原理

一、引向天线的工作原理

等幅不同相 ($I_2 = I_1 e^{j\beta}$)

$$\varphi = 90^\circ, F(\alpha) = \left| \cos\left(\frac{\beta + kd \cos \alpha}{2}\right) \right|$$

YOZ面阵因子图形



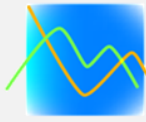
对ZOX平面, $\varphi = 0$, $f(\theta, \varphi) = 1 \times \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)$

$$d = 0.25\lambda$$

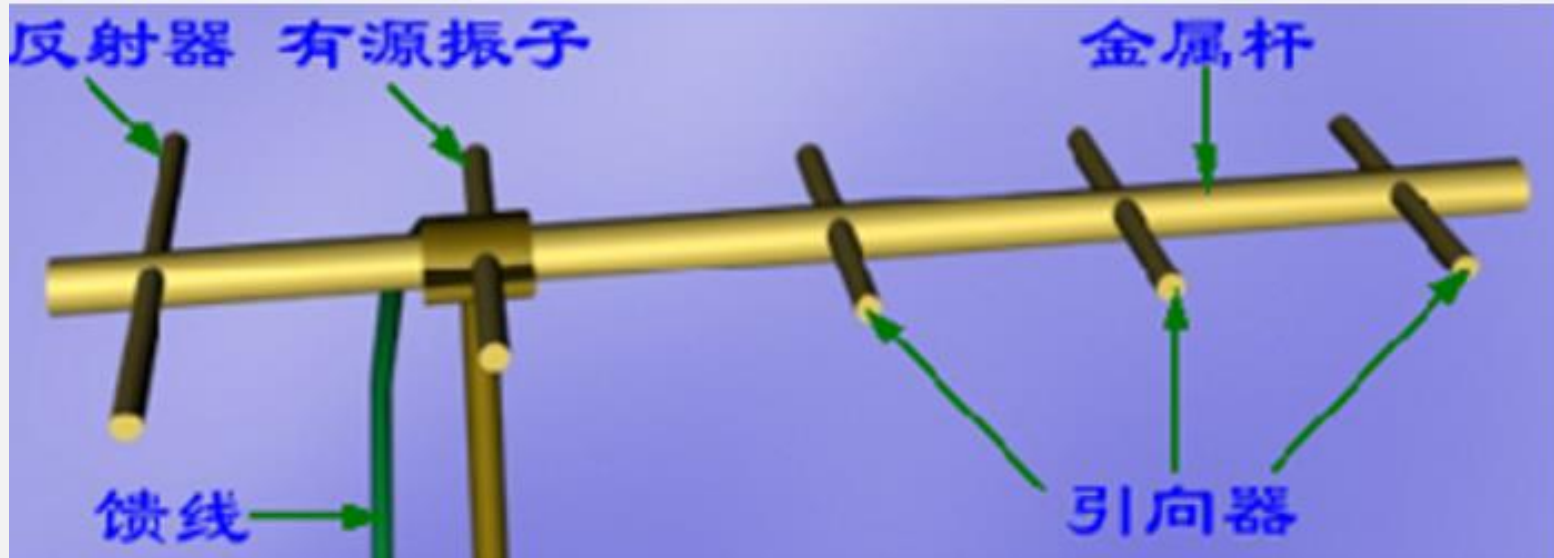
$$d = 1\lambda$$

反射器、
引向器

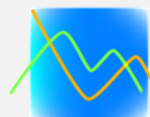
特点：电流初相的变化会导致方向图的空中旋转。



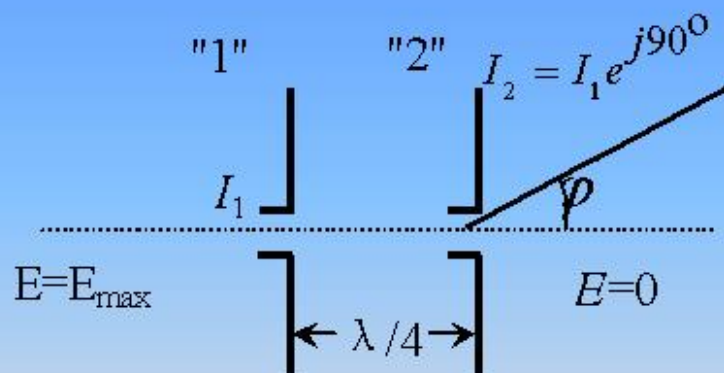
2.4.1 引向天线的工作原理



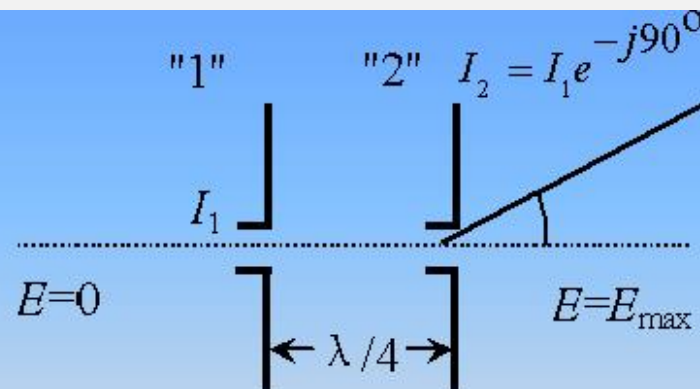
1、引向器与反射器



2.4.1 引向天线的工作原理

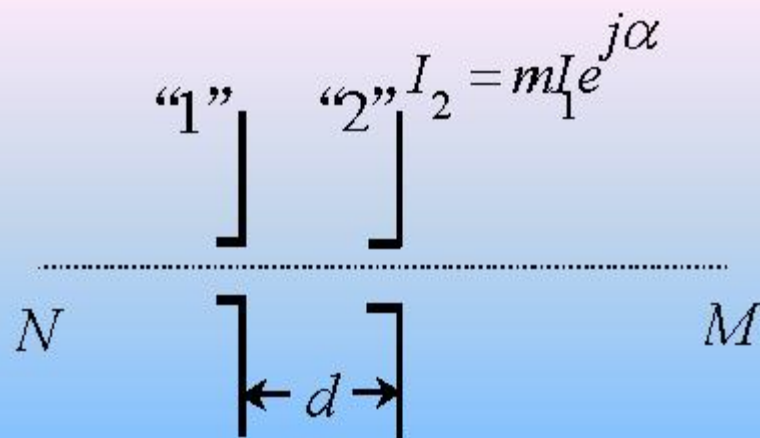


振子“2”为反射器



振子“2”为引向器

推广到一般情况



若 $d/\lambda \leq 0.4$ ，振子“2”作为引向器或反射器的电流相位条件是：

$$\begin{cases} \text{反射器} & 0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \\ \text{引向器} & -180^\circ \leq \alpha \leq 0^\circ \end{cases}$$



2.4.1 引向天线的工作原理

反射器 有源振子

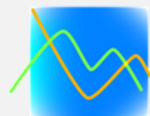
金属杆

馈线

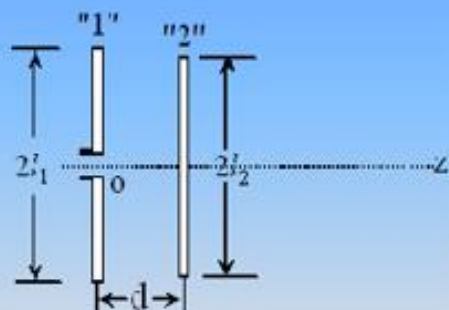
引向器

1、引向器与反射器

2、二元引向天线



2.4.1 引向天线的工作原理



二元引向天线

在有源振子电磁场的作用下，无源振子“2”上的感应电流由下式决定：

$$\frac{I_2}{I_1} = -\frac{Z_{21}}{Z_{22}} = me^{j\alpha}$$

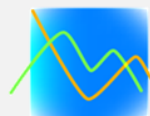
其中：

$$m = \sqrt{\frac{R_2^2 - X_{21}^2}{R_{22}^2 - X_{22}^2}} \quad \alpha = \pi + \tan^{-1} \frac{X_{21}}{R_{21}} - \tan^{-1} \frac{X_{22}}{R_{22}}$$

由上式可知：

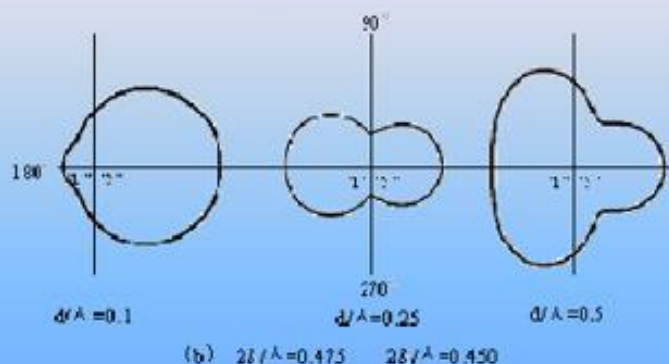
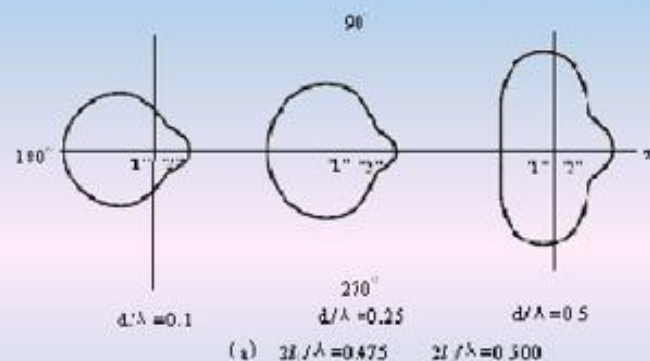
适当改变间距 d （可以改变互阻抗 Z_{21} ）或适当改变无源振子的长度 $2l_2$ （可以主要改变自阻抗 Z_{22} ）都可以调整 I_2 的振幅和相位，使无源振子“2”起引向器或反射器的作用。

在引向天线中，有源振子和无源振子的长度基本上都在 $\lambda/2$ 附近，此时方向函数及互阻抗随 d 的变化不太大，所以在近似计算时可以把单元天线的方向函数及单元间的互阻抗均按半波振子处理。至于自阻抗则因其对 l/λ 、 a/λ 的变化敏感，需要按振子的实际尺寸计算。



2.4.1 引向天线的工作原理

$\frac{d}{\lambda}$	$I_2/I_1 = me^{j\alpha}$		
	$2l_2/\lambda = 0.450$	$2l_2/\lambda = 0.475$	$2l_2/\lambda = 0.500$
0.10	0.800/-142.45°	0.806/180.01°	0.673/158.67°
0.15	0.728/-163.35°	0.731/168.34°	0.607/146.19°
0.20	0.659/-175.90°	0.661/155.37°	0.548/132.79°
0.25	0.597/170.50°	0.598/141.51°	0.496/118.67°
0.30	0.542/156.12°	0.544/126.97°	0.452/103.96°
0.35	0.495/141.16°	0.497/111.90°	0.413/88.78°
0.40	0.454/125.71°	0.455/96.39°	0.379/73.21°
0.45	0.418/109.89°	0.420/80.53°	0.349/57.31°
0.50	0.386/93.78°	0.388/64.39°	0.323/41.13°

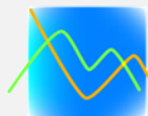


二元引向天线H面方向图

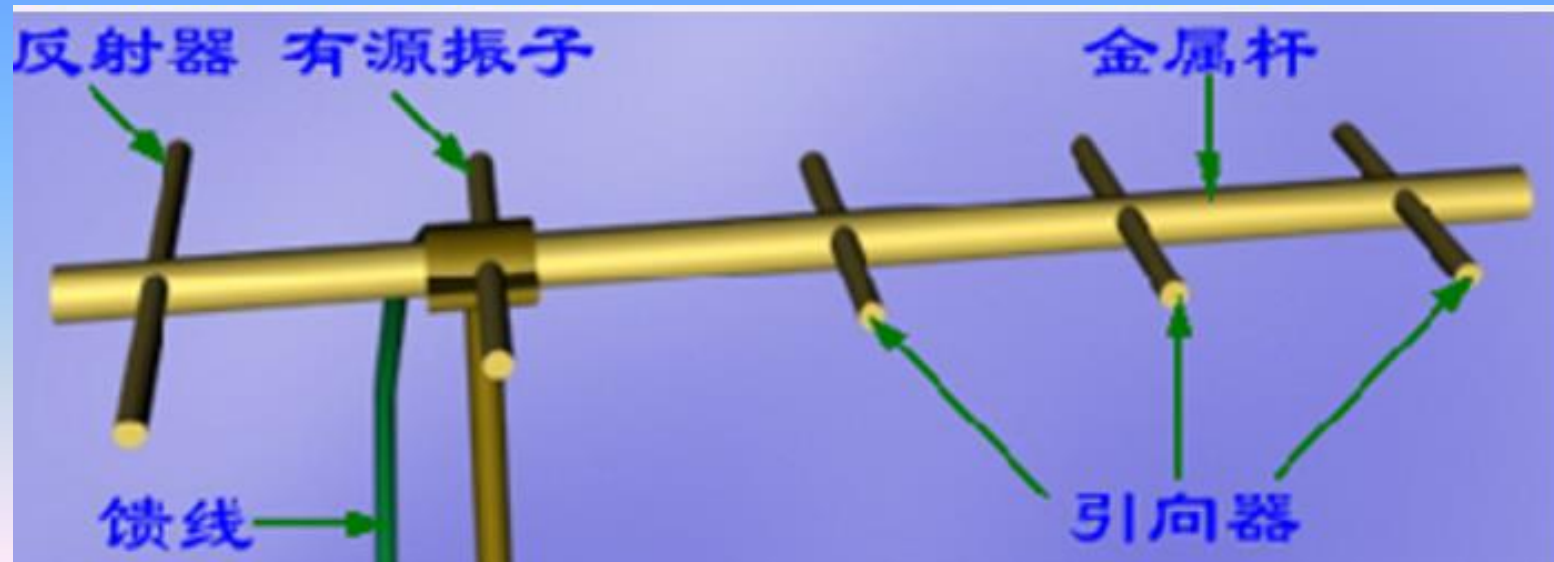
(1) 当有源振子 $2l_1/\lambda$ 一定时，只要无源振子长度 $2l_2/\lambda$ 及两振子间距 d/λ 选择得合适，无源振子就可以成为引向器或反射器。对应于合适的 d/λ 值，通常用比有源振子小百分之几的无源振子作引向器，用比有源振子大百分之几的无源振子作反射器。

(2) 当有源及无源振子长度一定时， d/λ 值不同，无源振子所起的引向或反射作用不同，例如对于 $2l_2/\lambda = 0.450$ ，当 $d/\lambda = 0.1$ 时有较强的引向作用，而当 $d/\lambda \geq 0.25$ 以后就变成了反射器。所以为了得到较强的引向或反射作用应正确选择或调整无源振子的长度及两振子的间距。

(3) 为了形成较强的方向性，引向天线振子间距 d/λ 不宜过大，一般 $d/\lambda < 0.4$ 。



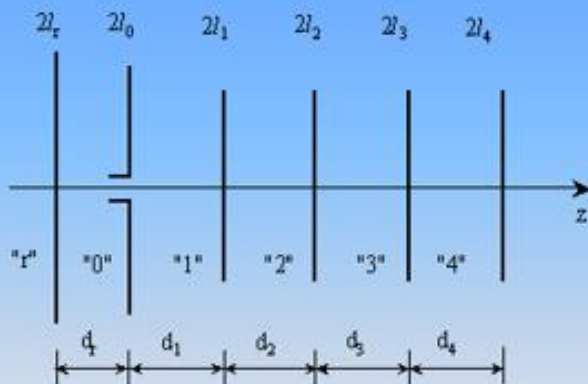
2.4.1 引向天线的工作原理



- 1、引向器与反射器
- 2、二元引向天线
- 3、多元引向天线

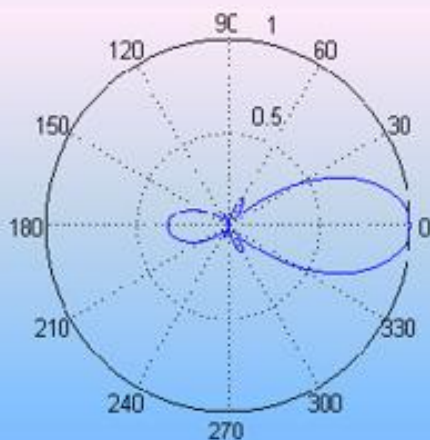


2.4.1 引向天线的工作原理

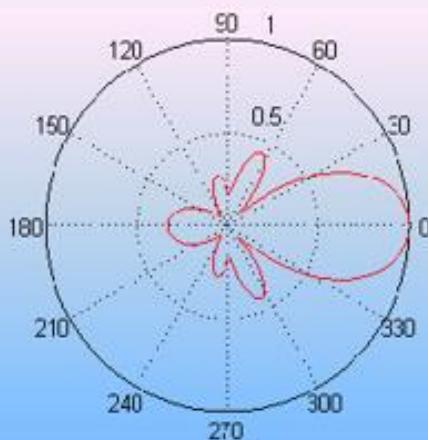


$$\begin{aligned} 2l_r &= 0.5\lambda, \quad 2l_0 = 0.47\lambda, \\ 2l_1 &= 2l_2 = 2l_3 = 2l_4 = 0.43\lambda \\ d_r &= 0.25\lambda, \quad d_1 = d_2 = d_3 = d_4 = 0.30\lambda \\ 2a &= 0.0052\lambda \end{aligned}$$

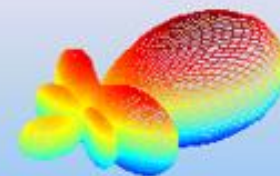
六元引向天线示意图



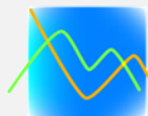
E面方向图



H面方向图



立体方向图

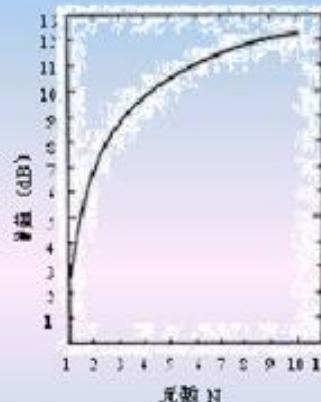


2.4.1 引向天线的工作原理

增益与总元数的关系

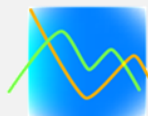
1、由于已经有了一个反射器，再加上若干个引向器对天线辐射能量的引导作用，在反射器一方的辐射能量已经很弱，再加多反射器对天线方向性的改善不是很大，通常只采用一个反射器就够了。

2、一般引向器数目越多，天线方向性就越强。但是实验与理论分析均表明，当引向器的数目增加到一定程度以后，再继续加多，对天线增益的贡献相对较小。不仅如此，引向器个数多了还会使天线的带宽变窄、输入阻抗减小，不利于与馈线匹配。加之从机械上考虑，引向器数目过多，会造成天线过长，不便于支撑。所以在米波波段实际应用的引向天线引向器的数目通常很少超过十三、四个。



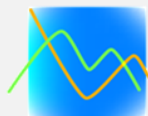
典型引向天线的增益与总元数的关系

($d=d_1=d_2=\dots=0.15\lambda$ $2a/\lambda=0.0025$)



输入阻抗

引向天线的各个振子之间存在着互耦，在无源振子的影响下，有源振子的输入阻抗将发生变化，不再和单独一个振子时相同。这种影响主要体现在两个方面，一是使有源振子的输入阻抗下降，二是使输入阻抗随频率变化得更厉害。半波振子的输入电阻约为70欧姆，在引向天线中如果用半波振子作有源振子，天线的输入电阻往往会大大下降，有时只有十几欧姆。而有的馈电平衡转换装置又具有阻抗变换作用，便使得天线很难与常用的同轴电缆（特性阻抗为50/75欧姆）匹配。为此，必须设法提高引向天线的输入电阻。除了通过调整天线尺寸提高输入电阻的方法以外，最有效也是最常用的措施是采用“折合振子”。另外，已知对称振子的输入阻抗随频率的变化比较厉害，现在又加上了无源振子的影响，变化得更厉害。所以引向天线一般只能在很窄的带宽（典型值为2%）内与馈线保持良好匹配。实用中常常不注重引向天线输入阻抗的精确值，主要以馈线上的驻波比为标准进行调整。当引向天线要求在稍宽的频带内工作时，只有牺牲对驻波比的要求。此时往往只要求驻波比小于2或者更差一点。

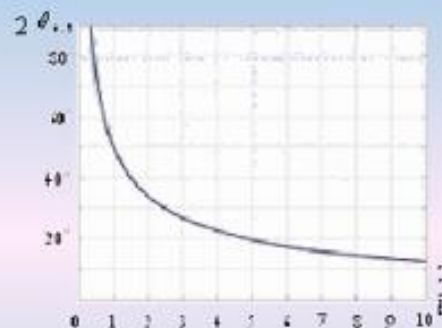


半功率角

半功率角的估算公式为：

$$2\theta_{0.5} \approx 55 \sqrt{\frac{\lambda}{L}} (^{\circ})$$

半功率角的估算曲线：



其中：

L 为引向天线的长度，是由反射器到最后一个引向器的几何长度；

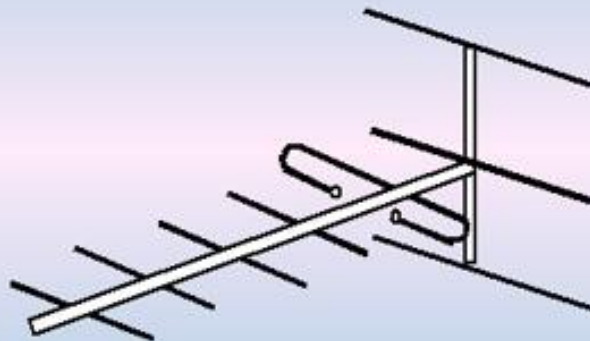
λ 为工作波长；

$2\theta_{0.5}$ 为两个主平面半功率角的平均值。

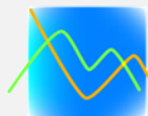


副瓣电平

- 1、引向天线的副瓣电平一般只有负几到负十几分贝， H 面的副瓣电平一般总是比 E 面的高。
- 2、引向天线往往具有较大的尾瓣，为了减小其尾瓣，可以将单根反射器换成反射屏或“王”形反射器等形式。

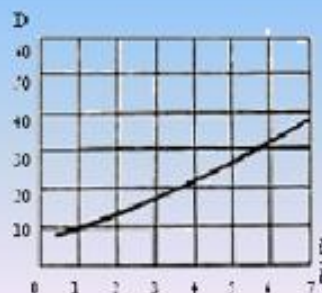


带“王”字形反射器的引向天线

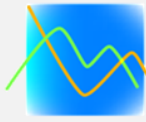


方向系数

方向系数估算曲线：



一般的引向天线长度 L/λ 不是很大，其方向系数只有10左右。当要求更强的方向性时，若频率不是很高，则可将几副引向天线排列成天线阵。



增益系数

引向天线的效率很高，差不多都在90%以上，因而引向天线的增益系数近似等于其方向系数，即：

$$G = \eta \cdot D \approx D$$

谢谢！

