

接收天线理论

接收天线的主要功能是将电磁波能量转化为高频电流（导波）能量。

接收天线在无线电波场内能感应出电流，并在接收天线输出端产生一个电动势。

感应电动势通过馈线向无线接收机输送电流。

接收天线是接收机的电源，接收机（包括馈线）是接收天线的负载。

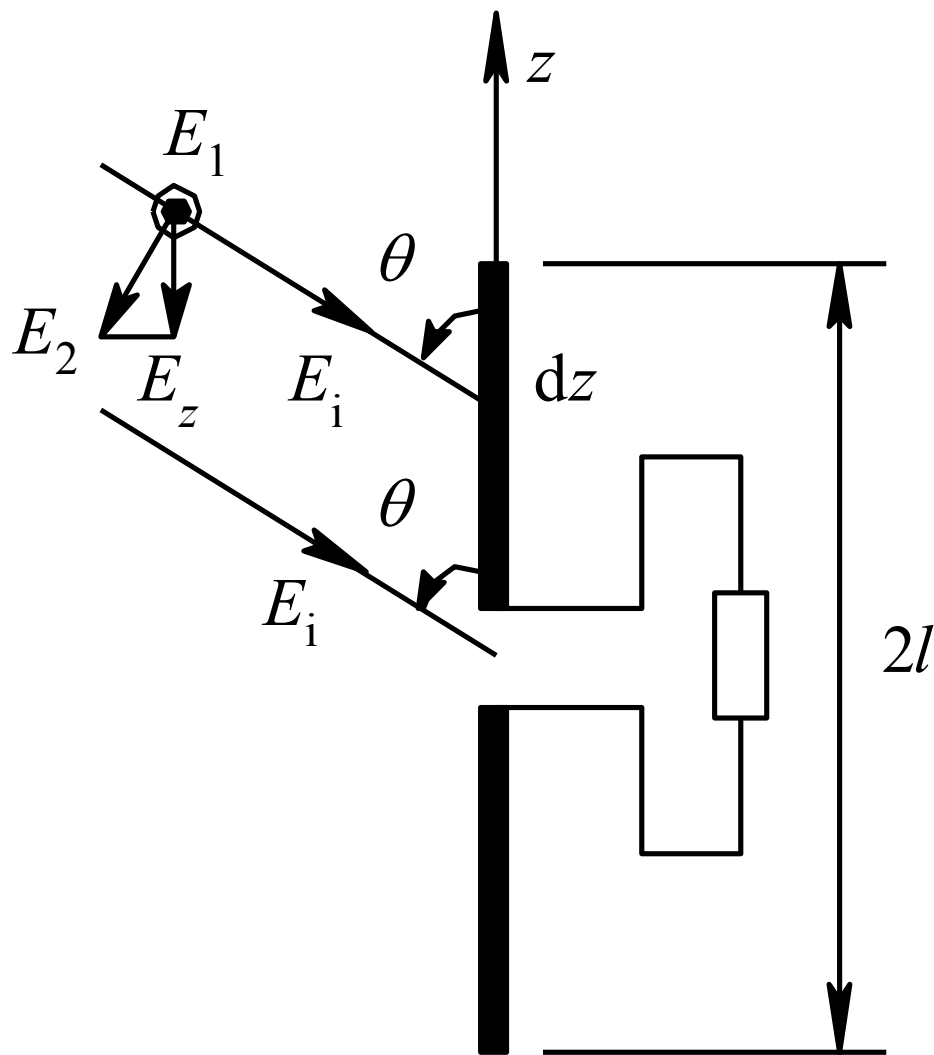
接收天线的研究内容：

- 1、接收天线的感应电动势和来波方向的关系；
- 2、接收天线的阻抗；
- 3、接收天线输出功率最大的条件；
- 4、接收天线的电参数。

接收天线理论

1. 天线接收的物理过程及收发互易性

下图所示为一接收天线，它处于外来无线电波 E_i 的场中，发射天线与接收天线相距甚远，因此，到达接收天线上各点的波是均匀平面波。设入射电场可分为两个分量：一个是垂直于射线与天线轴所构成平面的分量 E_1 ，另一个是在上述平面内的分量 E_2 。只有沿天线导体表面的电场切线分量 $E_z = E_2 \sin\theta$ 才能在天线上激起电流，在这个切向分量的作用下，天线元段 dz 上将产生感应电动势 $\varepsilon = -E_z dz$ 。



图： 天线接收原理

在入射场的作用下，接收天线上的电流分布为 $I(z)$ ，假设电流初相为零，则接收天线从入射场中吸收的功率 $dp = -\varepsilon I(z)$ 由上述分析得整个天线吸收的功率为

$$P = -\int_{-l}^l \varepsilon I(z) e^{-jkz \cos \theta} dz = \int_{-l}^l E_z I(z) e^{jkz \cos \theta} dz$$

式中，因子 $e^{jkz \cos \theta}$ 是入射场到达天线上各元段的波程差。这说明接收天线有方向性。

根据电磁场的边值理论，天线在接收状态下的电流分布应和发射时相同。因此假设接收天线的电流分布为

$$I(z) = I_m \text{sinc}(l - |z|)$$

则接收功率为：

$$\begin{aligned} p &= \int_{-l}^l E_2 I_m \sin k(l - |z|) e^{jkz \cos \theta} dz \\ &= 2 \int_{-l}^l E_2 I_m \sin \theta \sin k(l - z) \cos(kz \cos \theta) dz \end{aligned}$$

因此接收天线输入电动势为

$$\xi = \frac{p}{I_{in}} = \frac{2E_2 I_m}{I_m \sin kl} \sin \theta \int_0^l \sin k(l - z) \cos(kz \cos \theta) dz$$

根据上节有效长度的定义, 有

$$h_{ein} = \frac{I_m}{I_m \sin kl} \int_{-l}^l \sin(l - |z|) dz = \frac{1 - \cos kl}{k \sin kl}$$

得接收天线的表达式为

$$\xi = E_2 h_{\text{ein}} F(\theta) = E_i \cos \psi h_{\text{ein}} F(\theta)$$

式中, ψ 是入射场 E_i 与 θ 的夹角; θ 是方向角 θ 的单位矢量; h_{ein} 是接收天线归于输入电流的有效长度。

$F(\theta)$ 是接收天线的归一化方向函数, 它等于天线用作发射时的方向函数。

可见, 接收电动势 E 和天线发射状态下的有效长度成正比, 且具有与发射天线相同的方向性。如果假设发射天线的归一化方向函数为 $F(\theta_i)$, 最大入射场强为 $|E_i|_{\text{max}}$, 则接收天线的接收电动势为

$$E = |E_i|_{\text{max}} \cdot F(\theta_i) \cos \psi \cdot h_{\text{ein}} F(\theta_i)$$

当两天线极化正交时, $\psi=90^\circ$, $\mathbf{E}=\mathbf{0}$, 天线收不到信号。

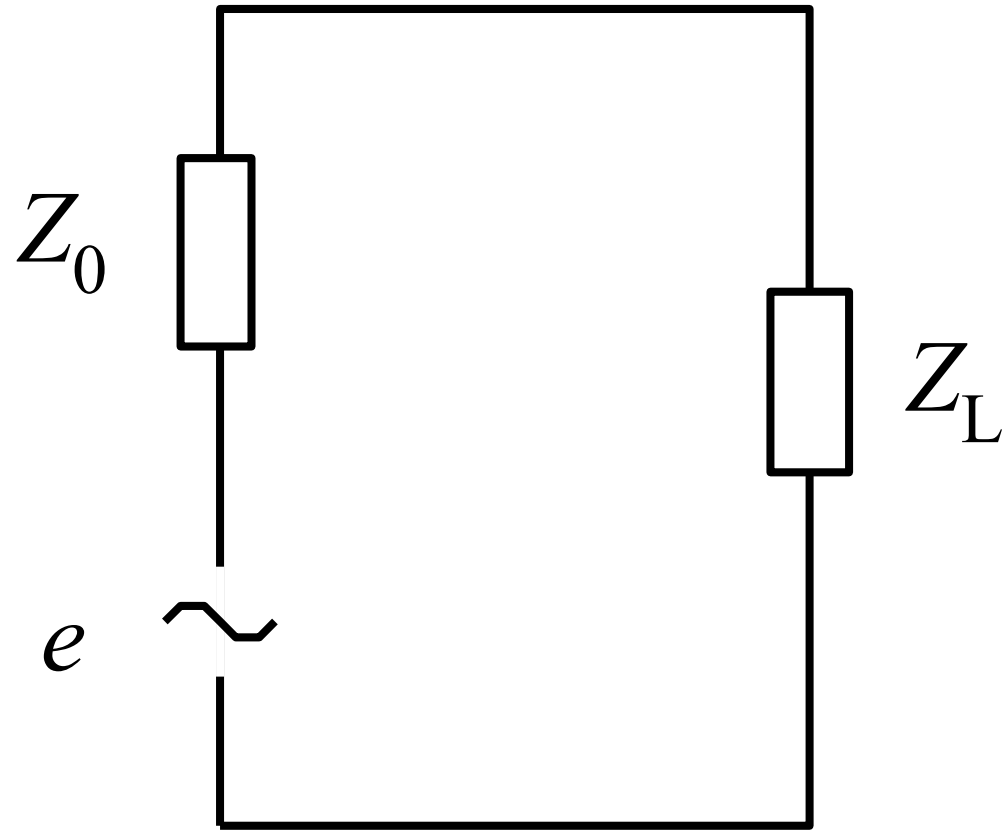
上述分析清楚地介绍了接收的物理过程并得出了方向性收发互易的结论。

天线接收的功率可分为三部分, 即

$$\mathbf{P}=\mathbf{P}_\Sigma+\mathbf{P}_L+\mathbf{P}_I$$

其中, \mathbf{P}_Σ 为接收天线的再辐射功率; \mathbf{P}_L 为负载吸收的功率; \mathbf{P}_I 为导线和媒质的损耗功率。

接收天线的等效电路如下图所示。图中 \mathbf{Z}_0 为包括辐射阻抗 $\mathbf{Z}_{\Sigma 0}$ 和损耗电阻 \mathbf{R}_{I0} 在内的接收天线输入阻抗, \mathbf{Z}_L 是负载阻抗。可见在接收状态下, 天线输入阻抗相当于接收电动势 \mathbf{E} 的内阻抗。



图：天线的等效电路

2. 有效接收面积

有效接收面积是衡量一个天线接收无线电波能力的重要指标。它的定义为：当天线以最大接收方向对准来波方向进行接收时，接收天线传送到匹配负载的平均功率为 P_{Lmax} ，并假定此功率是由一块与来波方向相垂直的面积所截获，则这个面积就称为接收天线的有效接收面积，记为 A_e ，即有

$$A_e = \frac{P_{Lmax}}{S_{av}}$$

式中， S_{av} 为入射到天线上电磁波的时间平均功率流密度，其值为

$$S_{av} = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_i^2}{\eta}$$

根据接收天线的等效电路，传送到匹配负载的平均功率（忽略天线本身的损耗）为

$$P_{L\max} = \frac{\xi^2}{8R_{\Sigma 0}}$$

当天线以最大方向对准来波方向时，接收电动势为

$$\xi = E_i \cdot l_e$$

$$R_{\Sigma 0} = \frac{30\pi d^2}{R_{\Sigma 0}} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |F(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi$$

将天线的方向系数公式代入上式得天线的有效接收面积为

$$A_e = \frac{D\lambda^2}{4\pi} \quad A_e = \frac{\lambda^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi |F(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi}$$

可见,如果已知天线的方向系数,就可知道天线的有效接收面积。**有效接收面积也称为有效口径。**

例如,电基本振子的方向系数为 **$D=1.5$** , **$A_e=0.12\lambda^2$** 。如果考虑天线的效率,则有效接收面积为

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi}$$

工程上通常是先利用其他办法求出 **A_e** ,再求方向系数 **D** 。

3. 等效噪声温度

接收天线的**等效噪声温度**是反映天线接收微弱信号性能的重要电参数。在卫星通信、射电天文和超远程雷达及微波遥感等设备中,由于作用距离甚远,所以接收的信号电平很低,此时用方向系数已不能判别天线性能的优劣,而必须以**天线输送给接收机的信号功率与噪声功率之比**来衡量天线的性能。等效噪声温度即是表征天线向接收机输送噪声功率的参数。

接收天线把从周围空间接收到的噪声功率送到接收机的过程类似于噪声电阻把噪声功率输送给与其相连的电阻网络。因此接收天线等效为一个温度为 T_a 的电阻,天线向与其匹配的接收机输送的噪声功率 P_n 就等于该电阻所输送的最大噪声功率,即

$$T_a = \frac{P_n}{k_b \Delta f}$$

式中， $K_b=1.38 \times 10^{-23}$ (J/K)为波耳兹曼常数，而 Δf 为与天线相连的接收机的带宽。

噪声源分布在天线周围的空间，天线的等效噪声温度为

$$T_a = \frac{D}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} T(\theta, \varphi) |F(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi$$

式中， $T(\theta, \varphi)$ 为噪声源的空间分布函数； $F(\theta, \varphi)$ 为天线的归一化方向函数。

显然， T_a 愈高，天线送至接收机的噪声功率愈大，反之愈小。 T_a 取决于天线周围空间的噪声源的强度和分布，也与天线的方向性有关。

为了减小通过天线而送入接收机的噪声，天线的最大辐射方向不能对准强噪声源，并应尽量降低旁瓣和后瓣电平。

4. 接收天线的方向性

从以上分析可以看出，收、发天线互易。也就是说，对发射天线的分析，同样适合于接收天线。但从接收的角度讲，要保证正常接收，必须使信号功率与噪声功率的比值达到一定的数值。为此，对接收天线的方向性有以下要求：

① 主瓣宽度尽可能窄，以抑制干扰。但如果信号与干扰来自同一方向，即使主瓣很窄，也不能抑制干扰；另一方面，当来波方向易于变化时，主瓣太窄则难以保证稳定的接收。

因此，如何选择主瓣宽度，应根据具体情况而定。

② 旁瓣电平尽可能低。如果干扰方向恰与旁瓣最大方向相同,则接收噪声功率就会较高,也就是干扰较大;对雷达天线而言,如果旁瓣较大,则由主瓣所看到的目标与旁瓣所看到的目标会在显示器上相混淆,造成目标的失落。因此,在任何情况下,都希望旁瓣电平尽可能的低。

③ 天线方向图中最好能有一个或多个可控制的零点,以便将零点对准干扰方向,而且当干扰方向变化时,零点方向也随之改变,这也称为零点自动形成技术。

5、接收天线的电参数

效率：天线向负载输出的最大功率 P_{\max} 和天线无耗时向负载输出(最佳输出)的功率 P_{opt} 的比值

$$\eta_A = \frac{P_{\max}}{P_{\text{opt}}}$$

接收天线的效率**等于**它用作发射天线时的效率

方向系数：假定从各个方向传来的电波场强相同，天线在某个方向上接收时，向负载输出的功率，与在其他方向接收时的功率的平均值之比。

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P_R}{P_{av}}$$

接收天线最大方向的方向系数与作为发射天线**完全相同**

增益系数：假定从各个方向传来的电波场强相同，天线在某个方向上接收时，向负载输出的功率，与在其他方向接收且无耗是传输到负载中的功率的均值之比。

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P}{(P_{av})_{\eta_A=1}}$$

天线作为接收天线时，和作为发送天线的增益是相同的，对于接收天线增益，同样有：

$$G(\theta, \varphi) = \eta_A D(\theta, \varphi)$$

一、天线阵的方向性

对称振子的方向性是很弱的。在通信中特别是点对点的通信，要求天线具有相当强的方向性。将天线绝大部分能量集中向某一预定方向辐射。单个对称振子是不能满足这种要求。这就需要寻求新的方法以达到增强天线方向性的目的。

将若干个单元天线，按一定规律排列起来构成的辐射系统称为天线阵。把能量分配到由多个振子组成的天线阵上去，可以使方向性增强。

天线阵排列要求每个单元天线应结构相同，尺寸相同、取向相同，即具有相同的方向函数 $F(\theta, \varphi)$ ，符合此条件的天线元称为相同元或相似元。阵列的形式可根据需要排成直线阵、平面阵、曲面阵和立体空间阵。

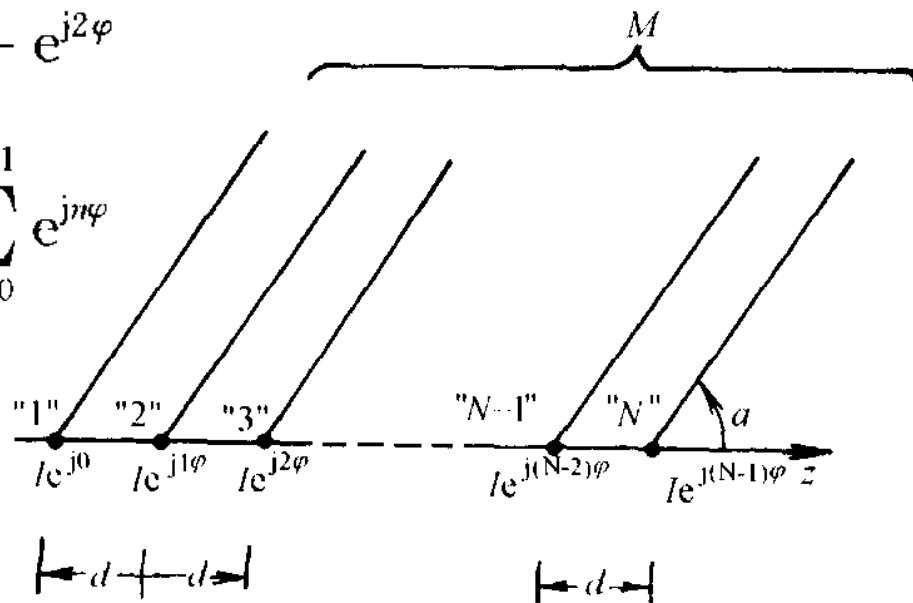
均匀直线阵

N 个阵元排列在一直线上，各元的电流幅度相等（ $I_1 = I_2 = \dots = I_N = I$ ），相邻元的间距相等（均为 d ），电流的相位依次递增（相邻元电流的相位相差 ψ ，此称之为 N 元均匀直线阵，如图所示。根据叠加定理， N 元均匀直线阵在远区 M 点的辐射场为

$$E = \sum_{i=1}^N E_i = E_1 [1 + e^{j\varphi} + e^{j2\varphi}$$

$$+ \dots + e^{j(N-1)\varphi}] = E_1 \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn\varphi}$$

式中 $\varphi = \psi + kd \cos \alpha$



容易得到

$$f_a(\alpha) = \frac{\sin\left(\frac{N\varphi}{2}\right)}{\sin\frac{\varphi}{2}} e^{j\frac{1}{2}(N-1)\varphi}$$

式中 $\frac{1}{2}(N-1)\varphi$ 是总场强的相位因子，若不选阵元“1”而是以阵的中点作为相位参考点，则此因子为零。在分析方向图时，可舍去相位因子，即

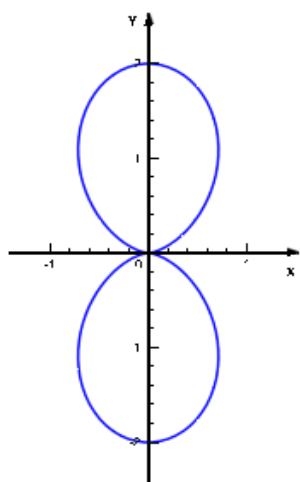
$$|f_a(\alpha)| = \left| \frac{\sin\left(\frac{N\varphi}{2}\right)}{\sin\frac{\varphi}{2}} \right|$$

归一化阵因子为：

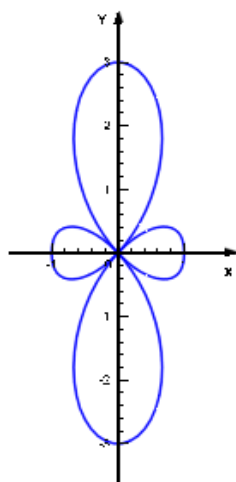
$$|F_a(\alpha)| = \frac{1}{N} \left| \frac{\sin\left(\frac{N\varphi}{2}\right)}{\sin\frac{\varphi}{2}} \right|$$

如图所示的是当 $\psi=0, d/\lambda=0.5$ 的条件下, N 为不同值时阵因子图形的几个例子。

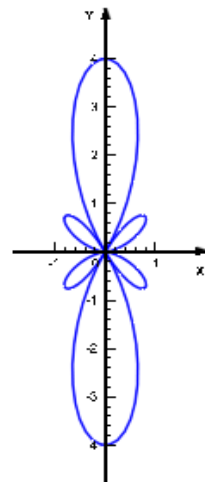
由图可以看出: 同相的 N 个单元均匀直线阵按 N 层排列时, 其赤道面内有两个或者更多个最大值, 并且主瓣的宽度随 N 数目的增加而变得尖锐; 同时副瓣的数目也有相应的增加。



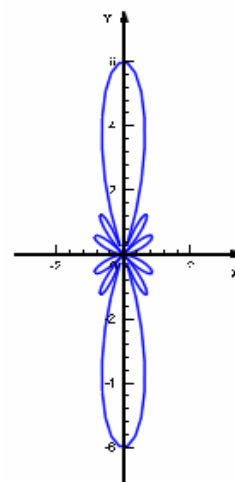
$N=2$



$N=3$



$N=4$



$N=6$

(1) 边射式天线阵

当均匀直线阵各单元天线上的电流相位都相同，此时 $\psi = 0$, $\varphi = kd \cos \alpha$ ，得到边射阵的归一化阵因子为：

$$F_{\alpha}(\alpha) = \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N}{2} kd \cos \alpha\right)}{\sin\left(\frac{1}{2} kd \cos \alpha\right)}$$

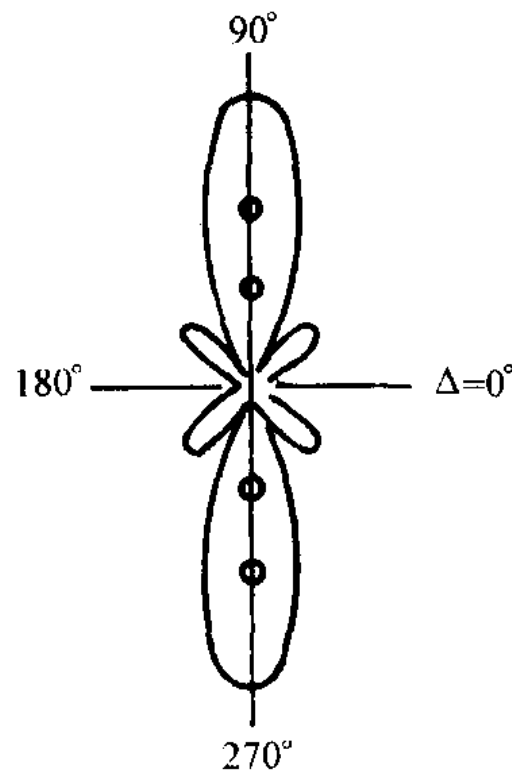
其最大辐射方向是在天线阵轴线的两边，故称“边射式”天线阵。

(2) 端射式天线阵

当均匀直线阵各单元天线上电流相位相反，即满足 $\psi = -kd$ 时，在+z方向获得最大辐射，其最大辐射方向是沿着天线的轴线，故称为“端射式”天线阵。

当 $\psi = \pi$ 、 $N = 4$ 、 $d/\lambda = 0.5$ 时，可得到阵因子的方向函数以及方向图。

$$f(\Delta) = \frac{\sin 4 \left(\frac{\pi}{2} \sin \Delta + \frac{\pi}{2} \right)}{\sin \left(\frac{\pi}{2} \sin \Delta + \frac{\pi}{2} \right)}$$



(3) 相位扫描直线阵

由天线元之间的相位差公式：

$$\xi = -kd \cos \theta_M$$

其中 θ_M 是主瓣最大方向，可知：

$$\theta_M = -\arccos\left(-\frac{\xi}{kd}\right)$$

改变 ξ 的值，就会改变 θ_M 的方向。即可实现天线阵不转动，而方向图在一定空域内转动。，称之为相位扫描。通过改变相邻元电流相位差实现方向图扫描的天线阵，称为**相控阵**。

θ_M 也频率有关，可以通过改变工作频率实现方向图扫描，称之为**频率扫描**。

(4) 强端射直线阵

端射直线阵的方向图具有较宽的主瓣，他的方向系数不是最优的，强端射直线阵是一种适当压缩主瓣宽度，是方向系数达到最大的改进型端射直线阵。

栅瓣和间距选择

最大值出现在 $\Psi=0$ 的大波瓣称为方向图主瓣，最大值出现在其他 Ψ 值的大波瓣称为方向图的栅瓣。消除栅瓣的方法是相邻元选择合适的间距。可按照下面公式选择相邻元之间的距离 d

$$\frac{d}{\lambda} = 1 - \frac{1}{n} - \frac{|\xi|}{2\pi}$$