



天线与电波传播

郭璐

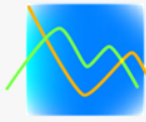
南京理工大学，电光学院通信工程系

2023年春季学期

办公室: 电光院A342

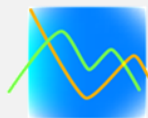
Email: lu.guo@njust.edu.cn





第1章 天线基础知识

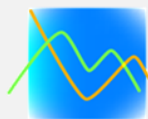
- 1.1 基本振子的辐射
- 1.2 发射天线的电参数
- 1.3 互易定理与接收天线的电参数
- 1.4 对称振子
- 1.5 天线阵的方向性
- 1.6 对称振子阵的阻抗特性
- 1.7 无限大理想导电反射面对天线电性能的影响



1.5.2 均匀直线阵

1. 均匀直线阵阵因子

为了更进一步加强阵列天线的方向性，阵元数目需要加多，最简单的多元阵就是均匀直线阵(Uniform Linear Arrays)。所谓均匀直线阵，就是所有单元天线结构相同，并且等间距、等幅激励而相位沿阵轴线呈依次等量递增或递减的直线阵。



如图1—5—13所示， N 个天线元沿 y 轴排列成一行，且相邻阵元之间的距离相等都为 d ，电流激励为 $I_n = I_{n-1} e^{j\zeta}$ ($n=2,3,\dots,N$)，根据方向图乘积定理，均匀直线阵的方向函数等于单元天线的方向函数与直线阵阵因子的乘积。

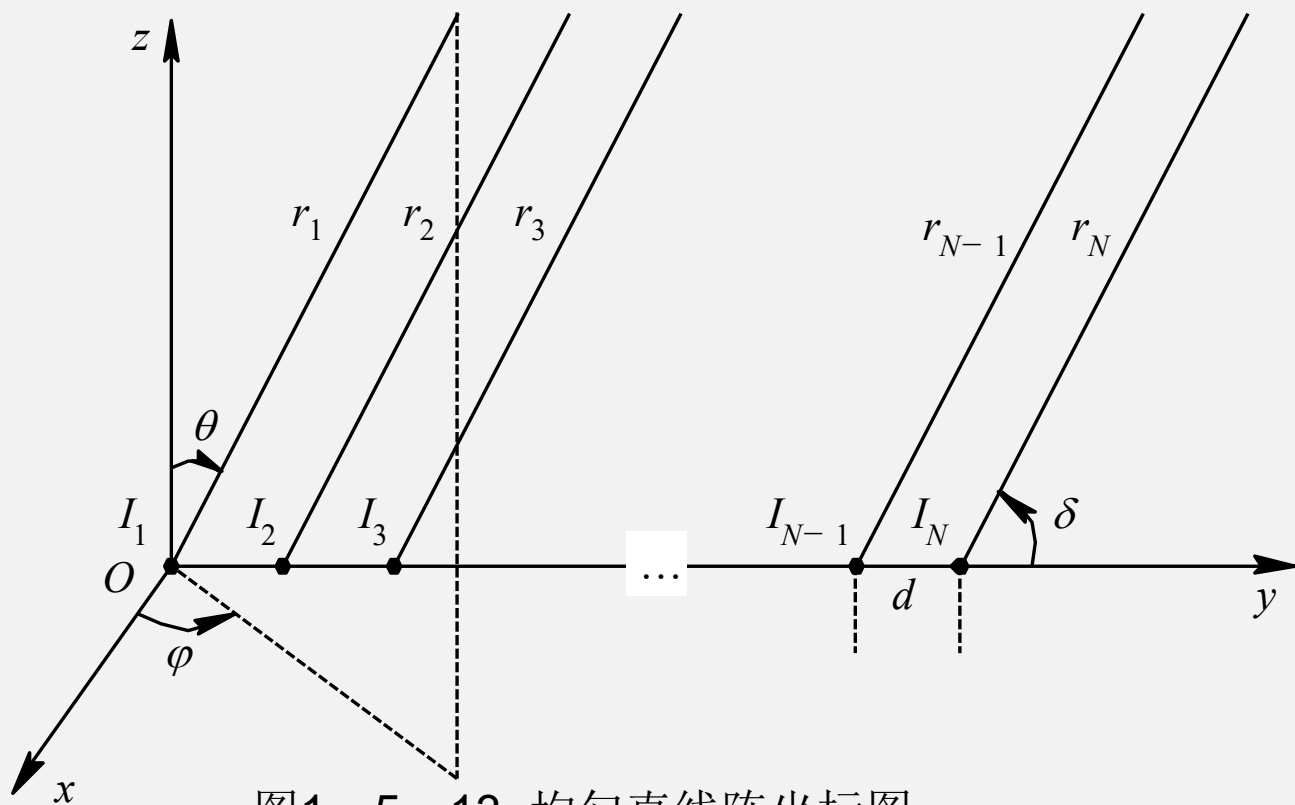
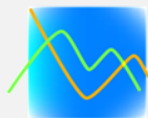


图1—5—13 均匀直线阵坐标图

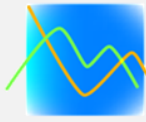


设坐标原点（单元天线1）为相位参考点，当电波射线与阵轴线成 δ 角度时，相邻阵元在此方向上的相位差为

$$\Psi(\delta) = \xi + kdc \cos \delta \quad (1-5-13)$$

与二元阵的讨论相似，N元均匀直线阵的阵因子为

$$\begin{aligned} f_a(\delta) &= \left| 1 + e^{j\psi(\delta)} + e^{j2\psi(\delta)} + e^{j3\psi(\delta)} + \cdots + e^{j(N-1)\psi(\delta)} \right| \\ &= \left| \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi(\delta)} \right| \end{aligned} \quad (1-5-14)$$



此式是一等比数列求和，其值为

$$\star f_a(\psi) = \left| \frac{\sin \frac{N\psi}{2}}{\sin \frac{\psi}{2}} \right| \quad (1-5-15)$$

$$\star F_a(\psi) = \frac{1}{N} \left| \frac{\sin \frac{N\psi}{2}}{\sin \frac{\psi}{2}} \right| \quad (1-5-16)$$

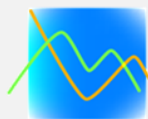


图1—5—14是N元均匀直线阵的归一化阵因子随 ψ 的变化图形。归一化阵因子 $F_a(\psi)$ 是 ψ 的周期函数，周期为 2π 。

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

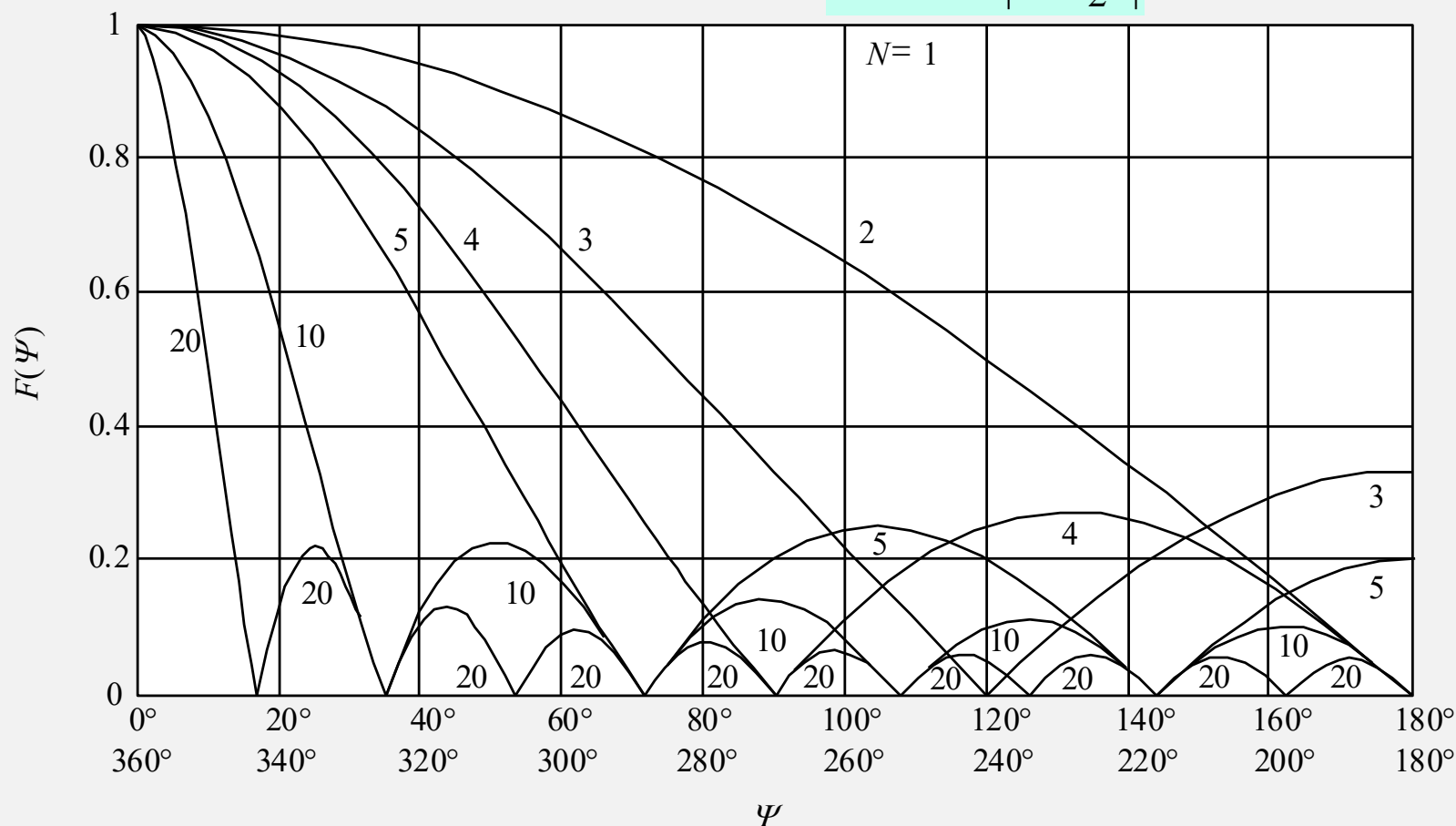
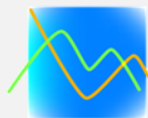


图 1—5—14



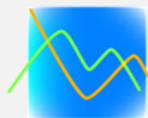
- 在 $\Psi \in 0 \sim 2\pi$ 的区间内，函数值为1发生在 $\underline{\Psi=0, 2\pi}$ 处，对应着主瓣或栅瓣（该瓣的最大值与主瓣的一样大）；
- 阵因子有 $N-2$ 个函数值小于1的极大值，发生在分子为1的条件下，对应着方向图副瓣，即

★
$$\psi_m = \frac{(2m+1)\pi}{N} \quad m = 1, 2, \dots, N-2 \quad (1-5-17)$$

- 有 $N-1$ 个零点，发生在分子为零而分母不为零时，

★
$$\psi_0 = \frac{2m\pi}{N} \quad m = 1, 2, \dots, N-1 \quad (1-5-18)$$

且第一个零点为 $\Psi_{01} = 2\pi/N$ 。



由于 δ 的可取值范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ ，与此对应的 Ψ 变化范围为



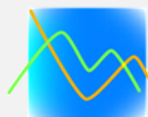
$$\underline{-kd+\xi < \Psi < kd+\xi} \quad (1-5-19)$$

Ψ 的这个变化范围称为可视区。只有可视区中 Ψ 所对应的 $F(\Psi)$ 才是均匀直线阵的阵因子。

Ψ 的可视区的大小与 d 有关， d 越大，可视区越大，易出现栅瓣。

可视区内的方向图形状与 d 和 ξ 同时有关， d 与 ξ 的适当配合才能获得良好的阵因子方向图。

$$\Psi(\delta) = \xi + kdcos\delta$$

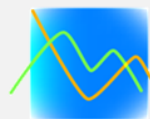


★【例题1—5—4】 设有一个五元均匀直线阵，间隔距离 $d=0.35\lambda$ ，电流激励相位差 $\xi=\pi/2$ ，绘出均匀直线阵阵因子方向图，同时计算极坐标方向图中的第一副瓣位置和副瓣电平、第一零点位置（见P33）。

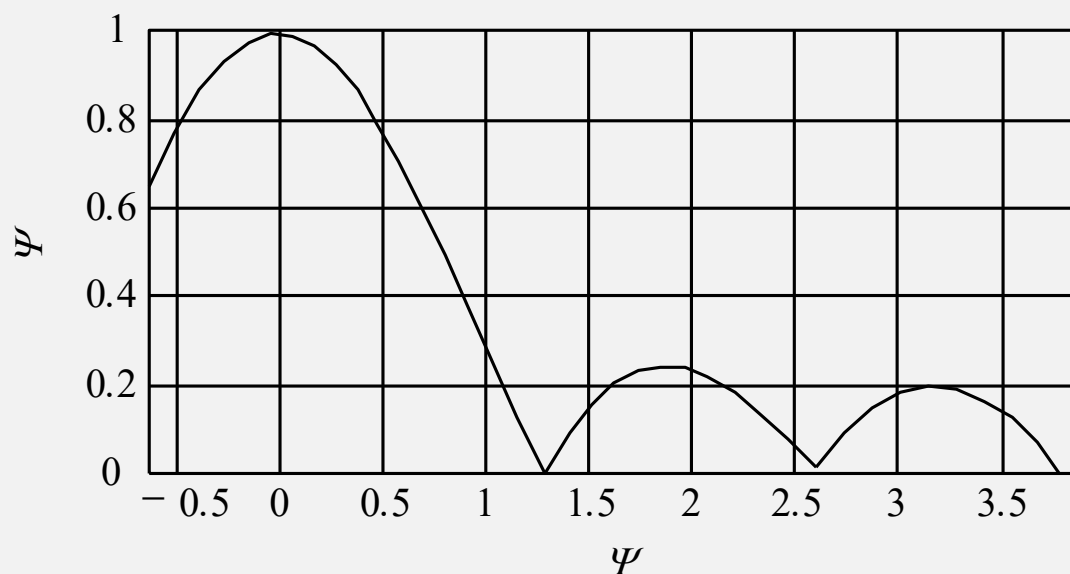
解： 相位差 $\psi = \xi + kd \cos \delta = \frac{\pi}{2} + 0.7\pi \cos \delta$

可视区 $-0.2\pi \leq \psi \leq 1.2\pi$ ，归一化阵因子为

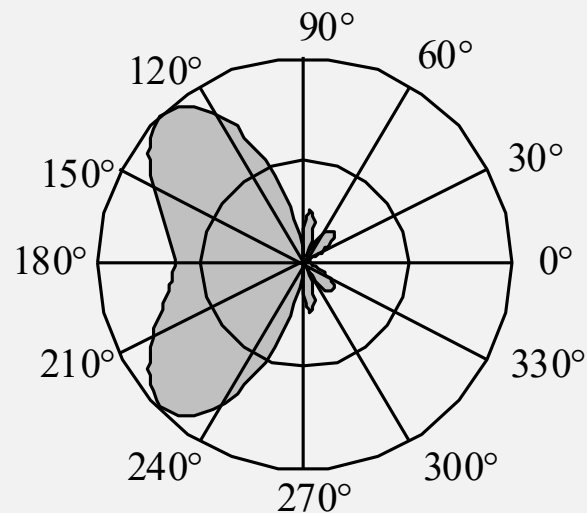
$$F_a[\psi(\delta)] = \frac{1}{5} \left| \frac{\sin \frac{5\psi}{2}}{\sin \frac{\psi}{2}} \right| = \frac{1}{5} \left| \frac{\sin[5(\frac{\pi}{4} + \frac{1.4\pi}{4} \cos \delta)]}{\sin(\frac{\pi}{4} + \frac{1.4\pi}{4} \cos \delta)} \right|$$



根据上式，在均匀直线阵的通用方向图中截取相应的可视区，即可得到五元阵阵因子 $F(\Psi)$ 的变化图形。依据 $F(\delta)$ 可以绘出极坐标方向图。对应图形见图1—5—15。



(a)



(b)

图1—5—15 例1—5—1阵因子方向图

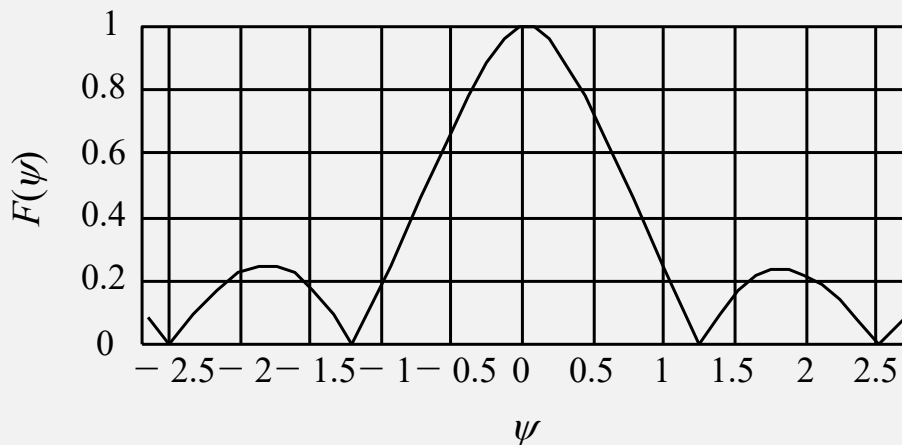
(a)在可视区内的 $F(\Psi)$; (b) $F(\delta)$ 的极坐标方向图



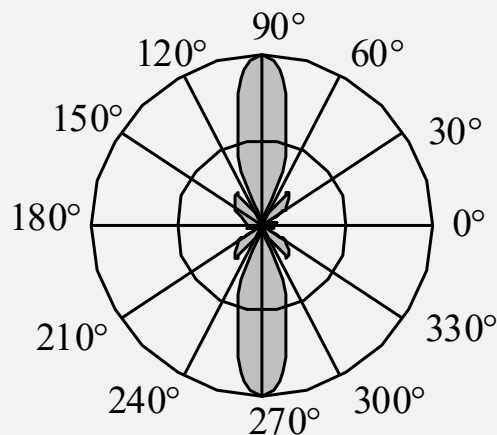
2.均匀直线阵的应用

1)边射阵（同相均匀直线阵）（Broadside Array）

当 $\xi=0$ 时， $\Psi=kd \cos\delta$ ， $\Psi=0$ 对应的最大辐射方向发生在 $\delta_{\max}=\pi/2$ ，由于最大辐射方向垂直于阵轴线，因而这种同相均匀直线阵称为边射或侧射式直线阵。

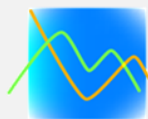


(a)



(b)

图1—5—16 边射阵方向图 $N=5, \xi=0, d=(3/7)\lambda$



当 d 加大时，可视区变大，栅瓣出现。栅瓣会造成天线的辐射功率分散，或受到严重干扰。防止栅瓣出现的条件是可视区的宽度 $\Delta\Psi_{\max} = |\Psi(\delta=0) - \Psi(\delta=\pi)| = 2kd$ 有一定的限制。对于边射阵，要求

$$\underline{\Delta\psi_{\max} < 4\pi} \Rightarrow \underline{d < \lambda} \quad (1-5-20)$$

$d < \lambda$ 就是边射式直线阵不出现栅瓣的条件。

- N越多， d 越大，边射阵主瓣越窄，副瓣电平也就越高。

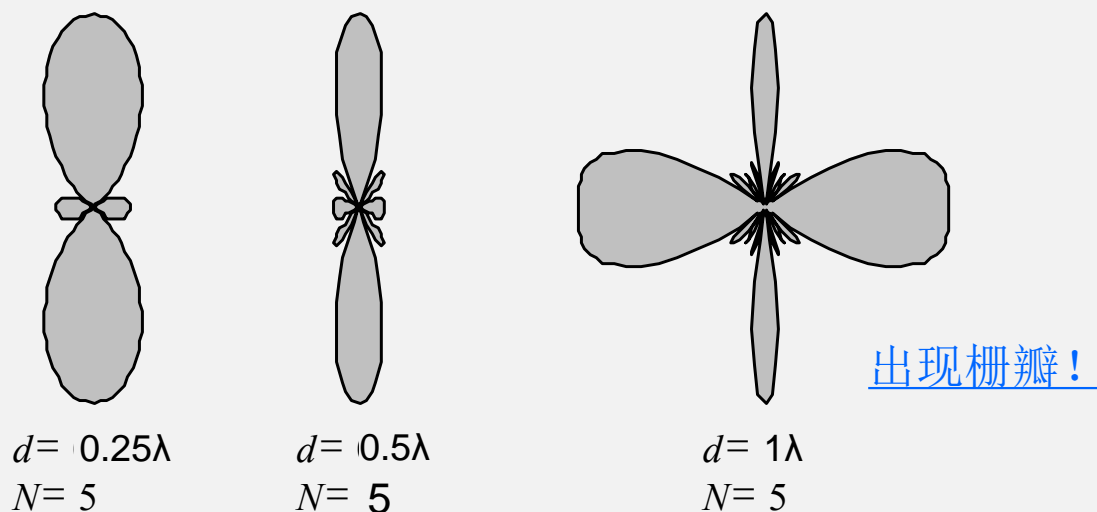
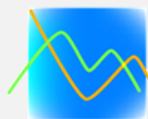


图1—5—17 边射阵阵因子极坐标方向图



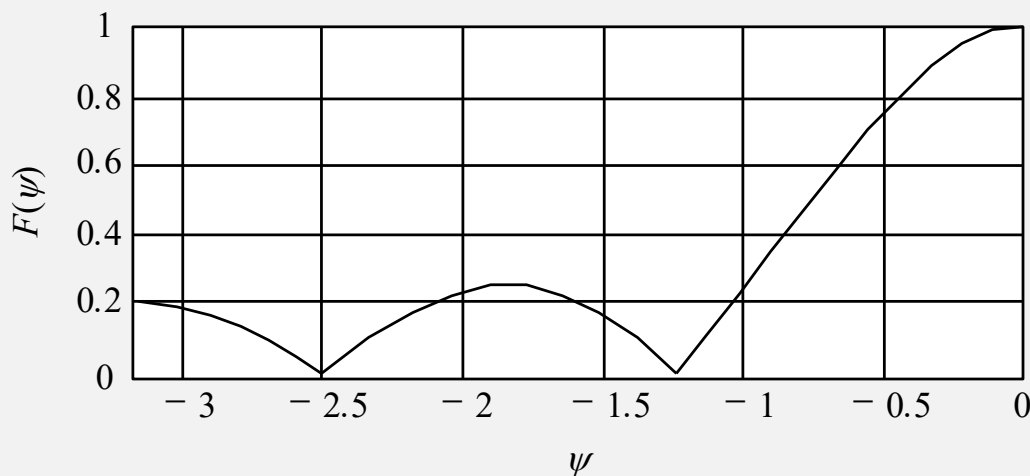
2) 普通端射阵 (Ordinary End-fire Array)

端射式天线阵是指天线阵的最大辐射方向沿天线阵的阵轴线 (即 $\delta_{\max} = 0$ 或 π)。此时要求 $\xi + kd \cos 0 = 0$ 或

$\xi + kd \cos \pi = 0$, 即

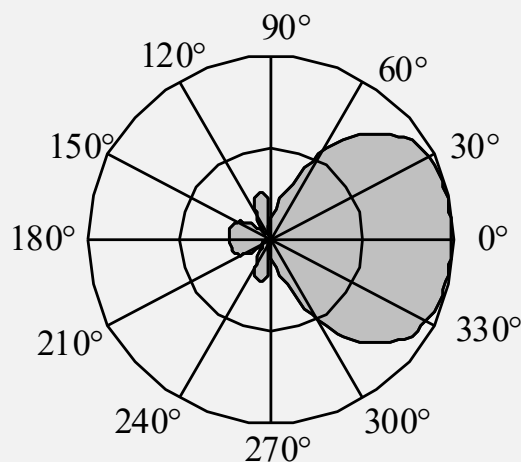
$$\xi = \begin{cases} -kd \\ +kd \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \delta_{\max} = 0 \\ \delta_{\max} = \pi \end{cases} \quad (1-5-21)$$

阵的各元电流相位沿最大辐射方向依次滞后 kd 。



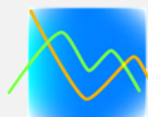
$N=5, d=0.25\lambda, \xi=-\pi/2$

(a)

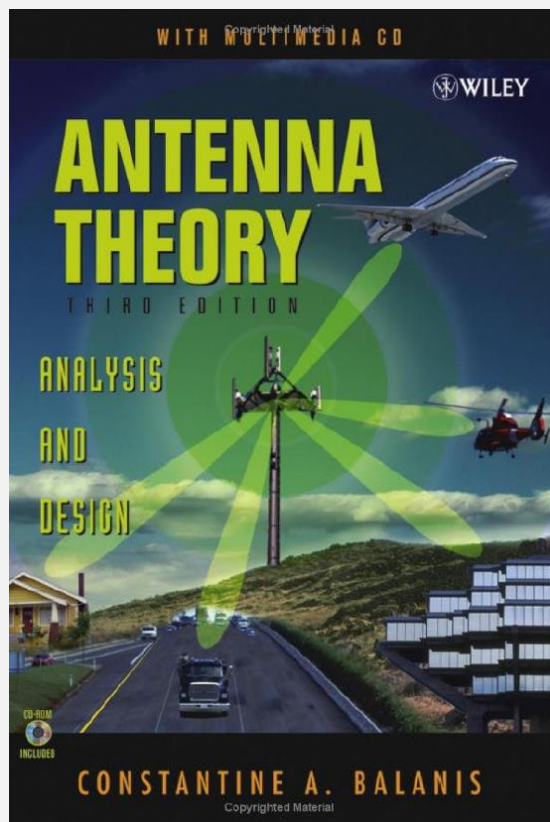
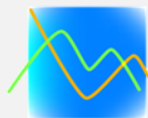


(b)

图 1—5—18



普通端射阵不产生栅瓣的条件为 ?

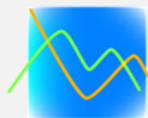


边射阵:

One of the objectives in many designs is to avoid multiple maxima, in addition to the main maximum, which are referred to as *grating lobes*. Often it may be required to select the largest spacing between the elements but with no grating lobes. To avoid any grating lobe, the largest spacing between the elements should be less than one wavelength ($d_{\max} < \lambda$).

端射阵:

If the element separation is $d = \lambda/2$, end-fire radiation exists simultaneously in both directions ($\theta_0 = 0^\circ$ and $\theta_0 = 180^\circ$). If the element spacing is a multiple of a wavelength ($d = n\lambda$, $n = 1, 2, 3, \dots$), then in addition to having end-fire radiation in both directions, there also exist maxima in the broadside directions. Thus for $d = n\lambda$, $n = 1, 2, 3, \dots$ there exist four maxima; two in the broadside directions and two along the axis of the array. To have only one end-fire maximum and to avoid any grating lobes, the maximum spacing between the elements should be less than $d_{\max} < \lambda/2$.



改变电流激励相位差 ξ ，最大辐射方向将由 $\xi + kd \cos \delta_{\max} = 0$ 决定，表示为

$$\delta_{\max} = \arccos \frac{-\xi}{kd} \quad (1-5-23)$$

当 d 给定后， δ_{\max} 将随 ξ 的变化而变化。连续地调整 ξ ，可以让波束在空间扫描，这就是相扫天线的基本原理。

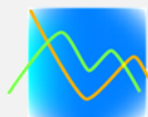


3) 强方向性端射阵（汉森-伍德耶特阵）（End-fire Array with Increased Directivity）由普通端射阵方向图（图1—5—18）的实例可知，尽管普通端射阵的主瓣方向唯一，但是它的方向图主瓣过宽，方向性较弱。

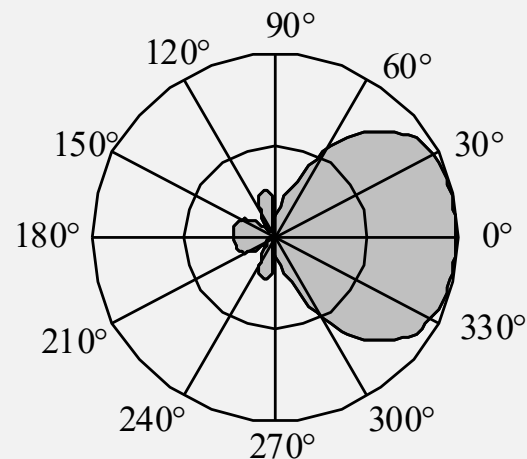
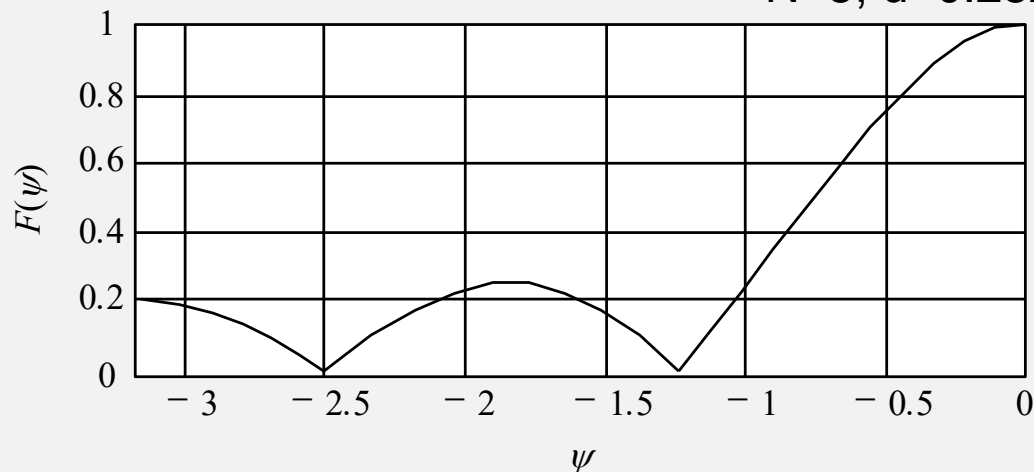
为了提高普通端射阵的方向性，汉森和伍德耶特提出了强方向性端射阵的概念。他们指出：对一定的均匀直线阵，通过控制单元间的激励电流相位差可以获得最大方向系数。具体条件是：

$$\xi = \pm kd \pm \frac{\pi}{N} \quad (1-5-24)$$

平移可视区！



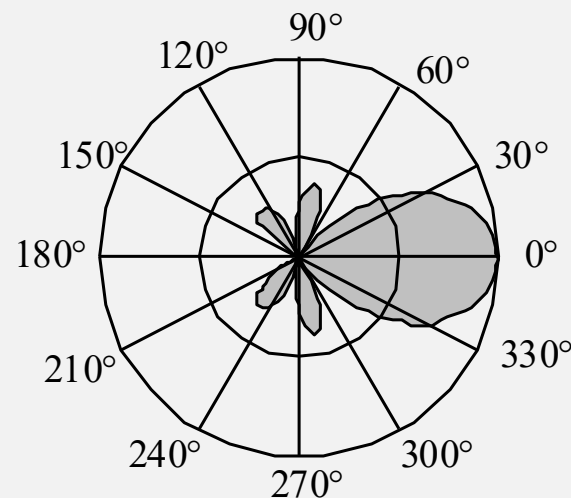
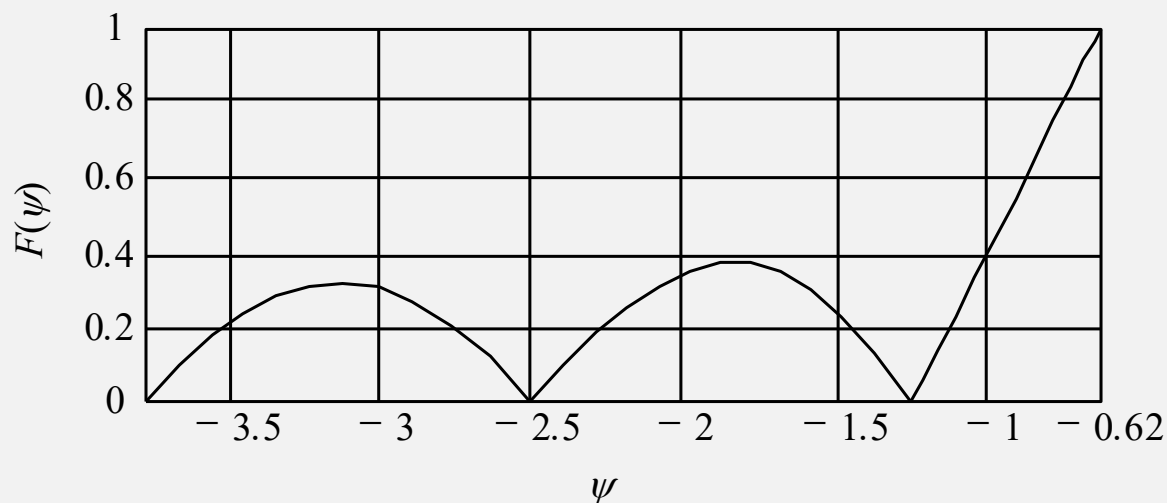
$$N=5, d=0.25\lambda, \xi=-\pi/2$$



平移可视区!

(a) 图 1—5—18

(b)



(a)

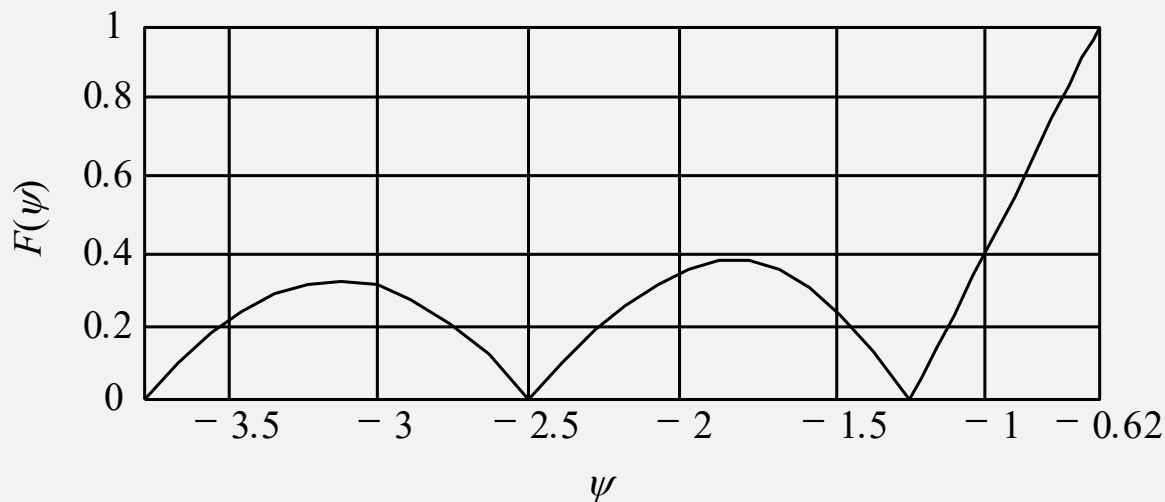
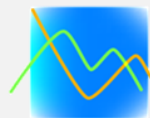
(b)

图1—5—19 强方向性端射阵方向图

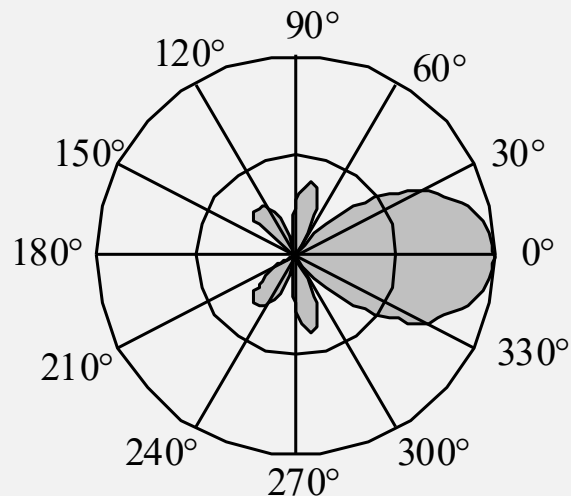


在相同元数和相同间隔距离的条件下，强方向性端射阵的主瓣比普通端射阵的主瓣要窄，因此方向性要强；但是它的副瓣电平比较大。

对于 $F(\Psi)$ 的图形而言，强方向性端射阵实际上是把可视区稍微平移，从而将普通端射阵的最大值以及附近变化比较缓慢的区域从可视区内移出了。



(a)



(b)

图1—5—19 强方向性端射阵方向图

为了防止出现栅瓣：

$$|\Delta\psi_{\max}| < 2\pi - \frac{\pi}{N} - \frac{\pi}{N} \quad (1-5-25a)$$

$$d < \frac{\lambda}{2} \left(1 - \frac{1}{N}\right) \quad (1-5-25b)$$

间隔距离受限的条件略比普通端射阵稍微严格一点。

谢谢！

