



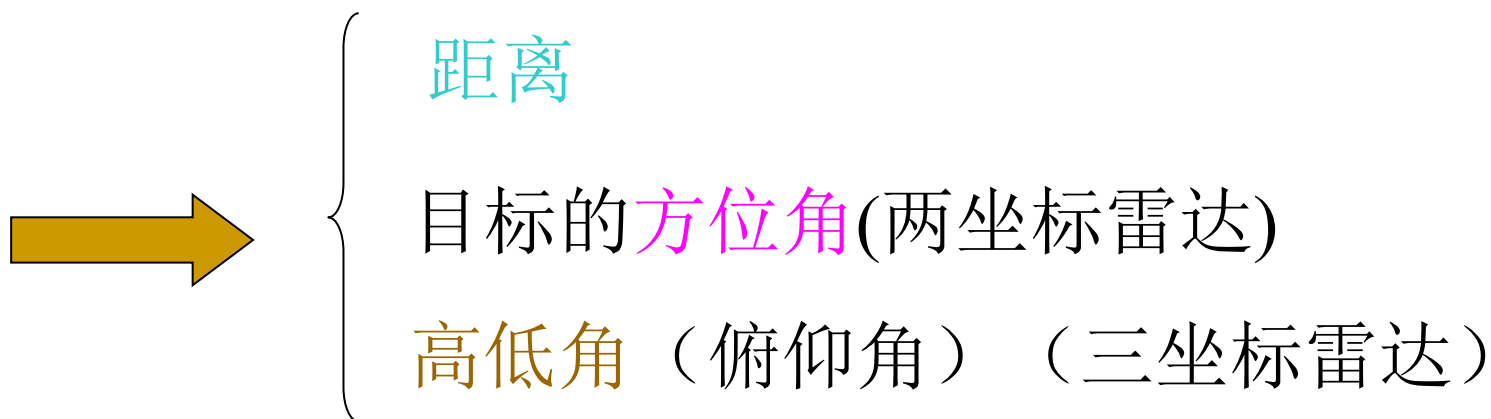
角度测量

主要内容及基本要求

理解测角的基本原理；
了解天线波束的扫描方法；

测角概述

确定目标的空间位置必须



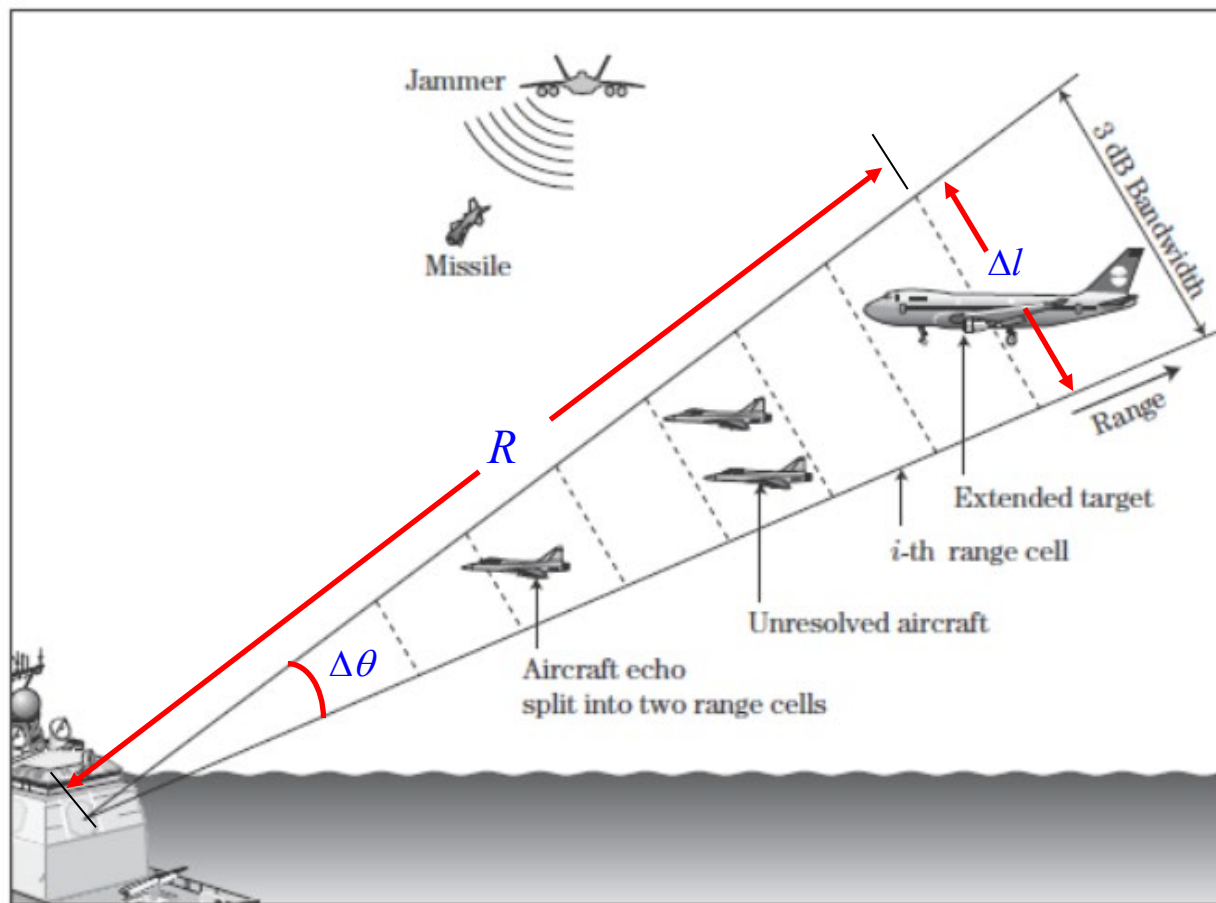
测角的物理基础

- 1) 电波在均匀介质中传播的直线性
- 2) 雷达天线波束的方向性，波束越窄则测角精度越高

直线性：理想情况

实际情况

修正：近距离，远距离



$$\Delta l \approx 2\pi \frac{\Delta\theta}{360^\circ} R$$

例如：

波束宽度 $\Delta\theta = 1^\circ$

目标距离 $R = 100km$

切向误差 $\Delta l \approx 1700m$

- 单一波束不能确定目标在天线波束主瓣内的具体位置，测角误差为波束宽度
- **基本测角思路**：形成多个重叠波束，比较目标在不同波束的回波幅度或相位差异 ➡ **振幅法**，**相位法**

测角方法与比较

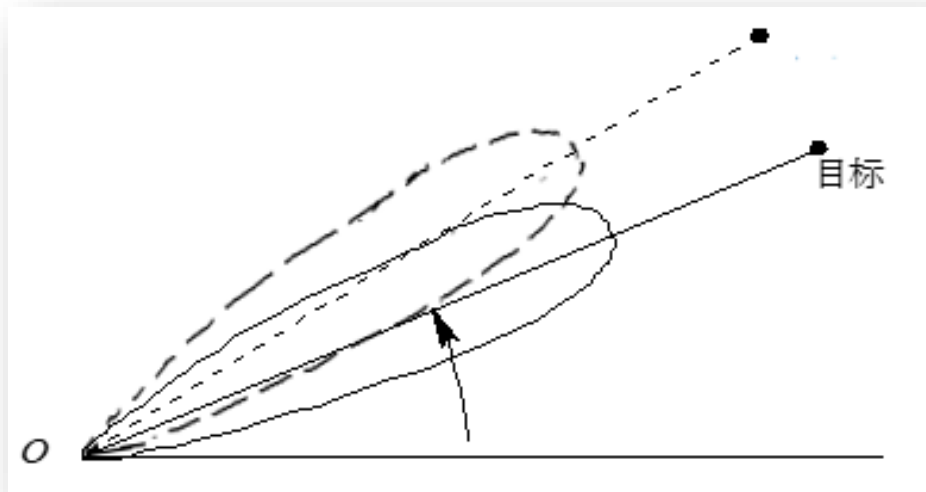
振幅法测角

1. 最大信号法

以两坐标雷达为例，天线波束在方位上扫描，只有当天线波束的轴线

对准目标时，回波强度才达到最大。回波强度最大时**天线轴线指的方向即为目标方向。**

天线波束对雷达回波的调制：天线波束扫过目标时，回波从无到有，由小变大，再由大变小，最后消失



测角方法与比较

1. 最大信号法特点

● 优点

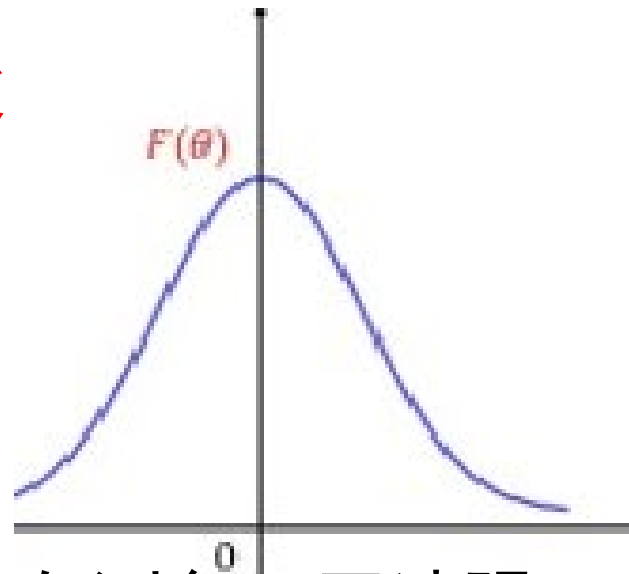
- 测量方法简单

- 利用天线方向图函数的最大值方向测角，回波强度最高，信噪比最大，对检测发现目标有利

● 缺点

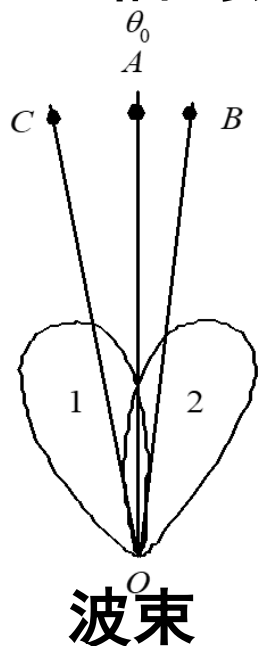
- 最强点不易判断，测量精度不高：方向图最大值附近比较平坦，最大值不容易判定

- 不能用于自动测角：不能判断目标偏离轴线的方向，广泛用于搜索和引导雷达



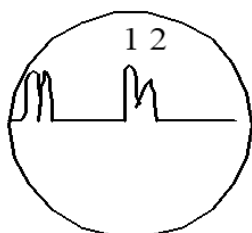
2. 等信号法

- 基本原理：采用两个相同且彼此重叠的波束，当两个波束收到的回波信号强度相同时，等信号轴（立即OA）方向为目标方向。比较两个波束回波的强弱就可以判断目标偏离等信号轴的方向，并可用查表等方式估计目标偏离等信号轴的大小。

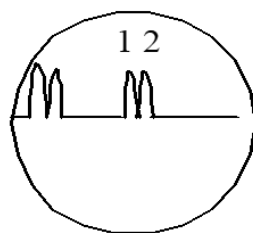


波束1回波强于波束2回波

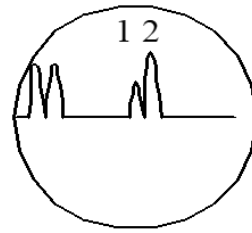
波束2回波强于波束1回波



OC方向



OA方向



OB方向

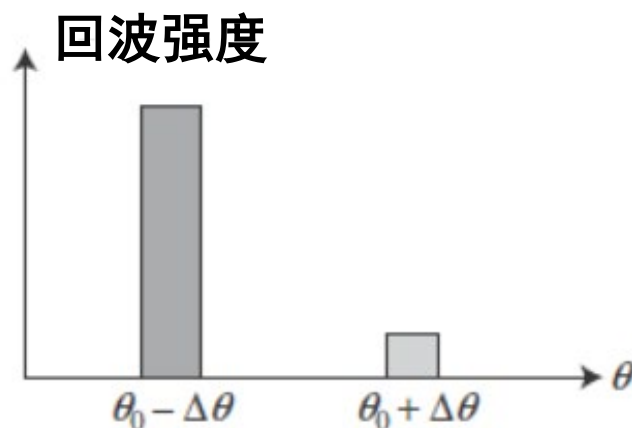
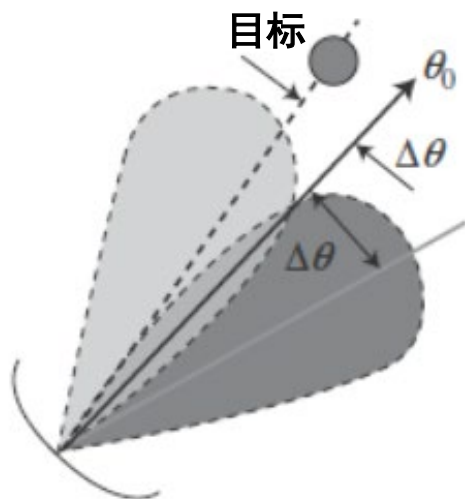
显式器画面（回波情况）

2. 等信号法

● 实现途径：

- 顺序波瓣法：只要一套接收系统，波束1、2在时间上交替出现（例如：圆锥扫描等方式）

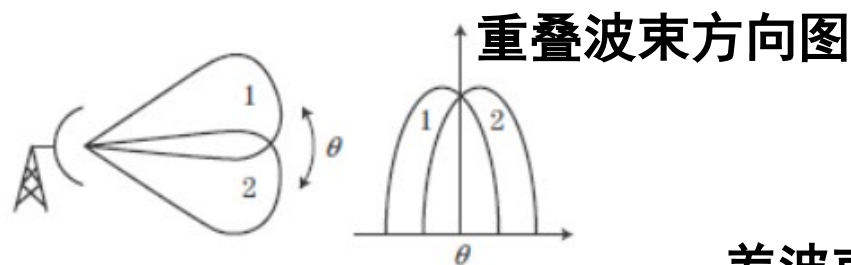
顺序波瓣：先在预测目标方向的一侧观测，然后在另一侧再次观测



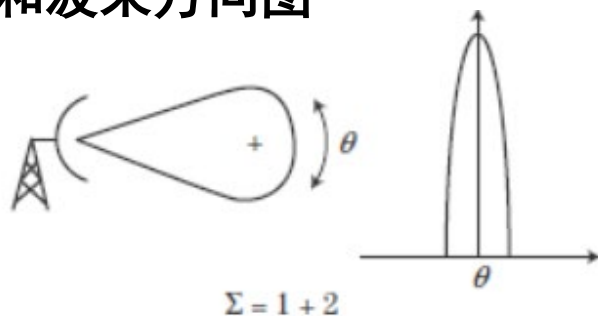
- 同时波瓣法（基于幅度的单脉冲测角）：两个波束同时存在，简单理解为采用两套相同的接收系统同时工作；由于两波束同时接收回波，对RCS起伏目标相对顺序波瓣法测角更稳健。

2. 等信号法

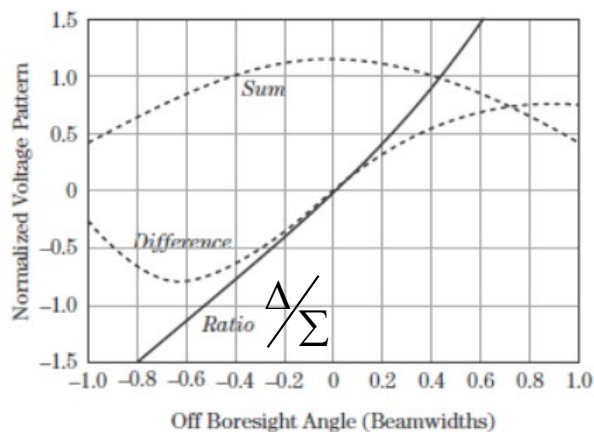
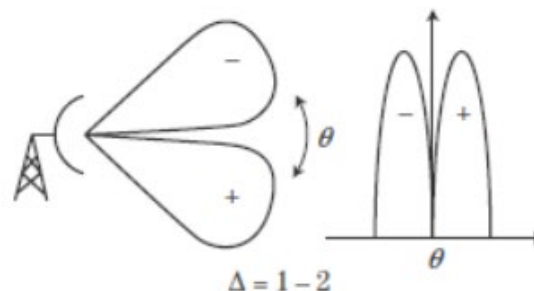
● 基于幅度的单脉冲测角



和波束方向图



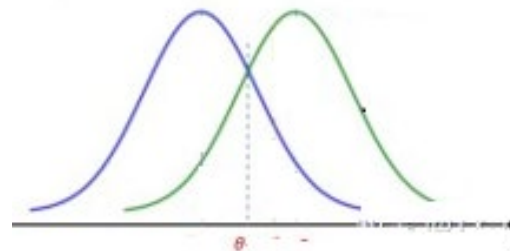
差波束方向图



$$\frac{\Delta}{\Sigma} = k\theta_t$$

和差波束信号之比正比于目标偏离等信号轴的角度 θ_t

2. 等信号法



● 优点

- 测角精度比最大信号法高：等信号轴附近方向图斜率较大，目标略微偏离等信号轴时，两信号强度变化比较显著
- 根据两波束收到的信号强弱可判断目标偏离等信号轴的方向，便于自动测角，常用于跟踪雷达

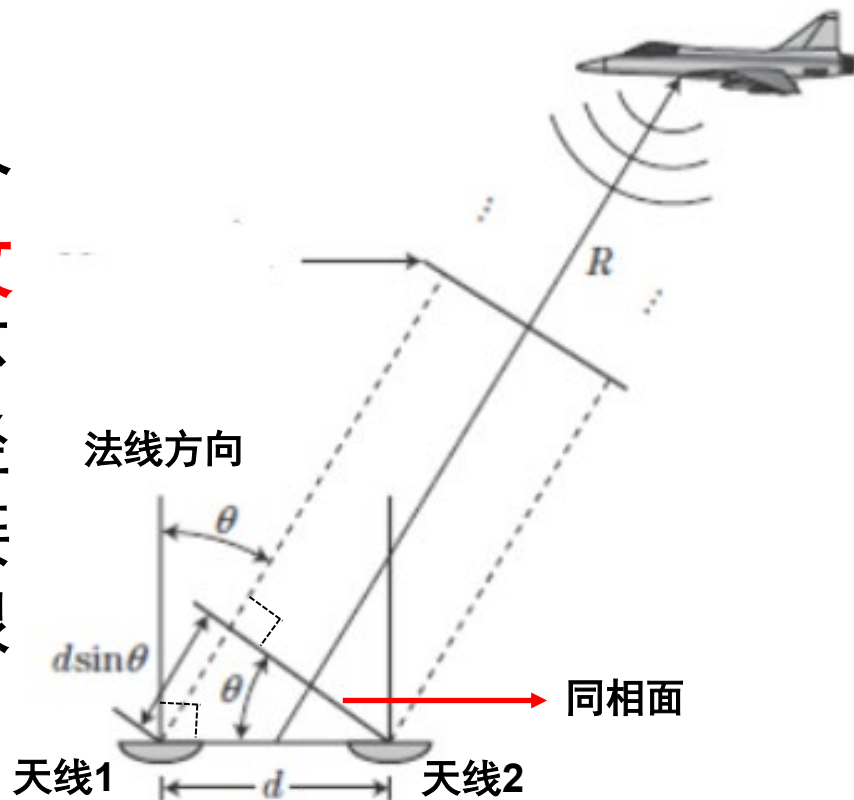
● 缺点

- 等信号轴方向不是方向图最大值方向，相同发射功率条件下，作用距离比最大信号法小些
- 测角系统较为复杂

相位法测角（也常称为基于相位的单脉冲测角）

基本原理

- 空间不同位置分布的两个完全相同的天线同时接收信号，由于天线的位置不同，接收信号的传播路径不同，从而导致两天线接收的信号存在相位差，根据相位差估计目标方向



$$\text{波程差 } \Delta R = d \sin \theta$$

↑ 远场假设 $R \gg d$,
电磁波近似为平面波



$$\text{两天线信号相位差 } \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$$

↑ 窄带信号假设



测角误差与多值性

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$$

$$d\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \cos \theta d\theta$$

$$d\theta = \frac{\lambda}{2\pi d \cos \theta} d\varphi$$

减少误差的方法：

采用读数精度高 ($d\varphi$ 小) 的相位差测量方法

减小 λ / d 值 (增大 d / λ 值)

当 $\theta=0$ 时测角误差 $d\theta$ 最小。 θ 的范围有一定的限制

增大 d/λ 虽可提高测角精度，但会带来测角模糊

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$$

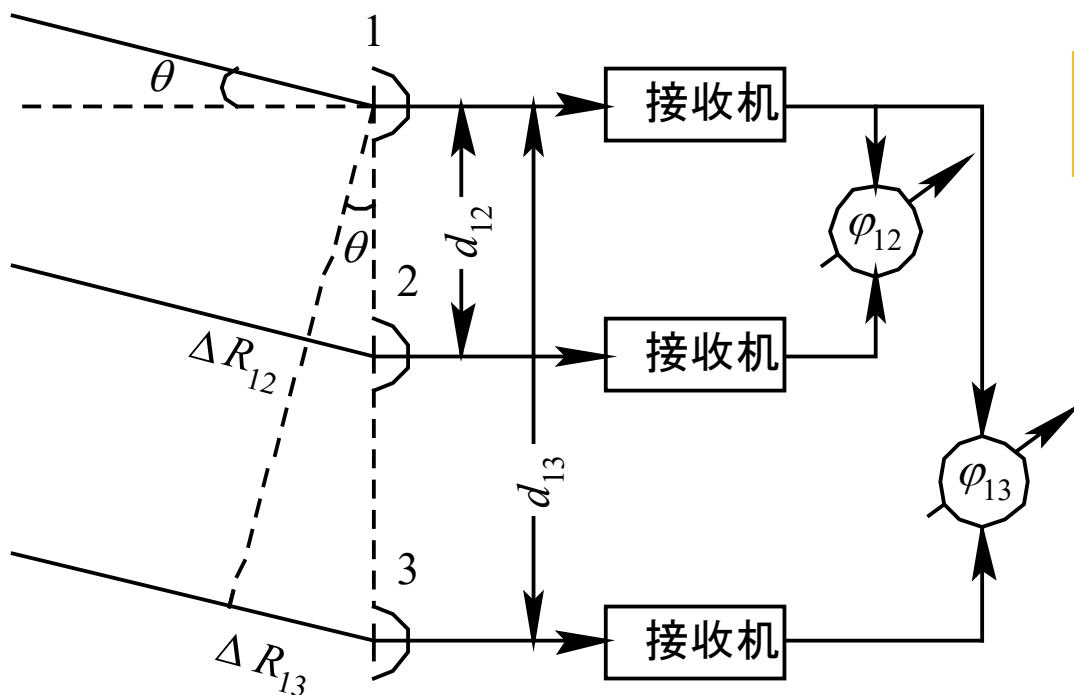
$$\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_2 + 2\pi$$

区分不出两角度

$d \leq \frac{\lambda}{2}$ 测角不模糊

$$\varphi_{12} = \frac{2\pi}{\lambda} d_{12} \sin \theta < 2\pi$$

$$\varphi_{13} = \frac{2\pi}{\lambda} d_{13} \sin \theta = 2\pi N + \psi$$



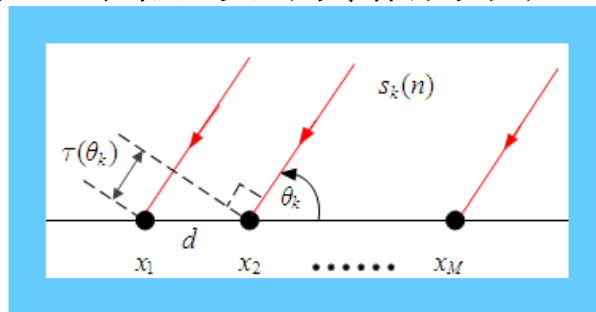
三天线相位法测角原理示意图（多基线）

阵列天线测向（空间谱估计）

- 利用空间不同位置分布的多个天线接收到的信号之间的**相位差异性**（**本质是时间差异**）估计目标方向（即信号的传播方向）

- 空域匹配滤波

- 阵列空间响应，阵列信号流型
- 多个信号模型
- 空域匹配滤波，同相相加



- **超分辨率测角（能分辨一个波束内的多个目标的方向）**

- 波束形成的局限：需大孔径
- 多目标阵列数据模型
- 数据协方差矩阵的特征分解及物理解释
- 信号子空间与噪声子空间
- 最大似然法、MUSIC法等
- 相关目标的高分辨率测角

- **难点**

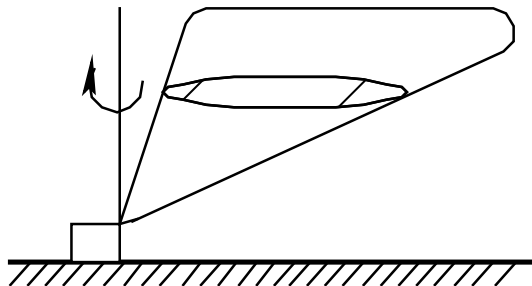
- 多个相干源信号的空域滤波与测向
- 宽带信号的空域滤波与测向

天线波束的扫描方法

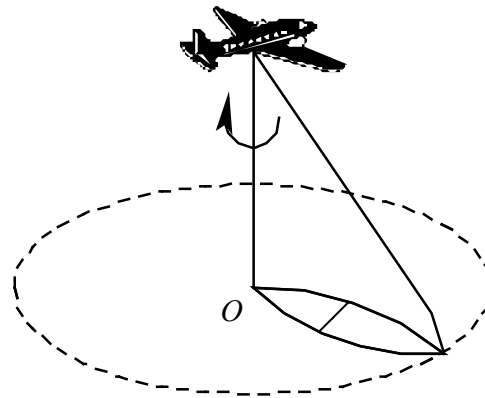
● 波束形状和扫描方法

雷达波束以一定的方式依次照射给定空域，以进行目标探测和坐标测量，即天线波束需要扫描

1. 扇形波束（通常做圆周扫描和扇扫，两坐标雷达）

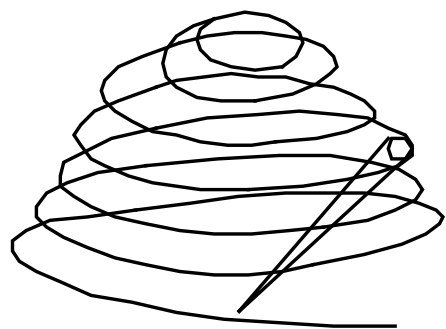


(a)

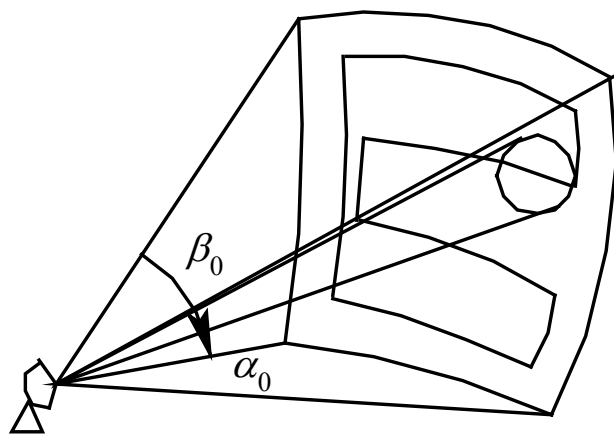


(b)

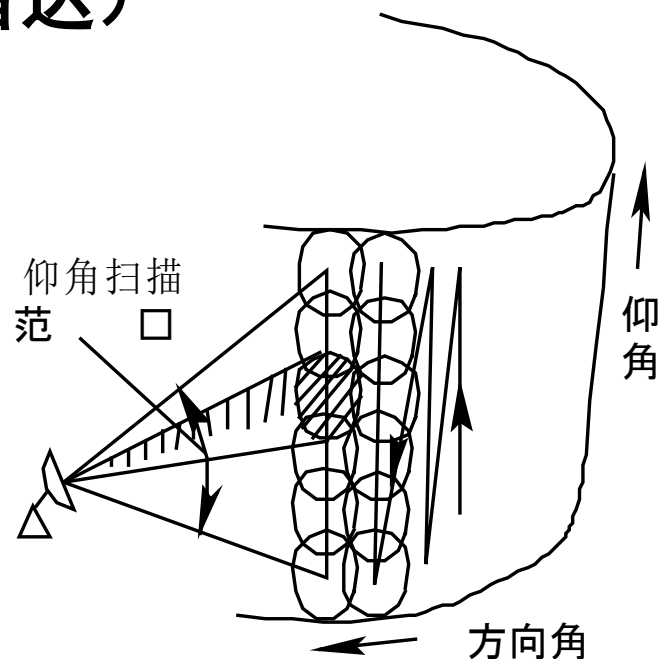
2. 针状波束（常用于三坐标雷达）



(a)



(b)



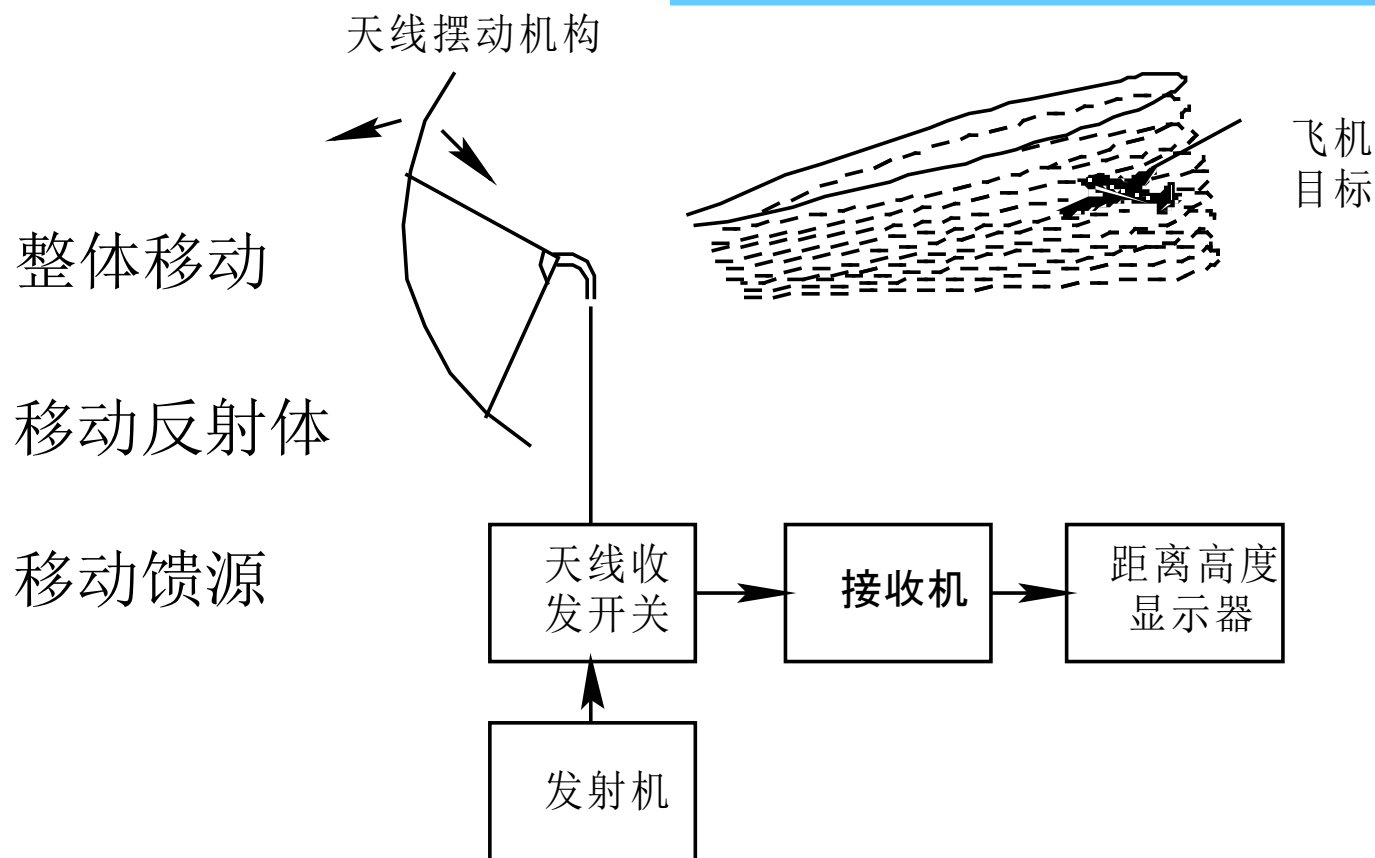
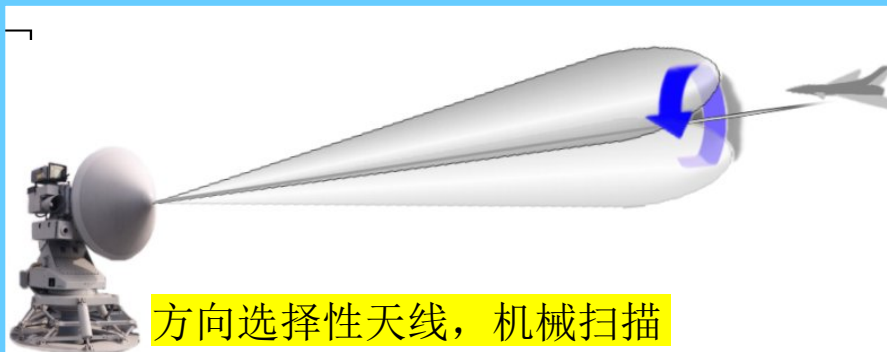
(c)

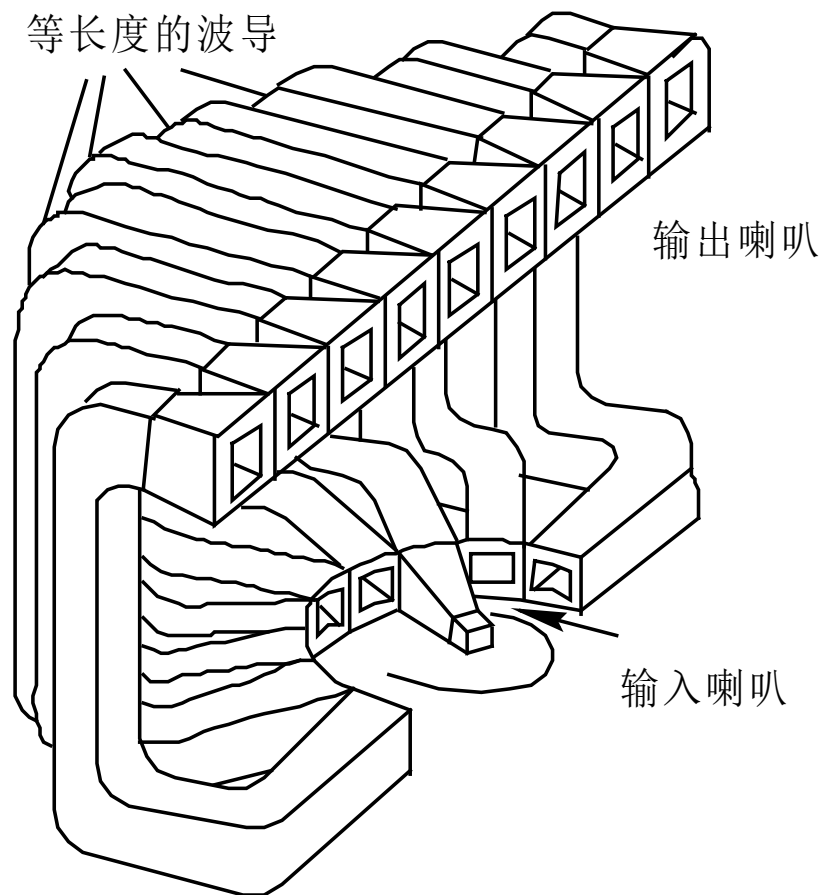
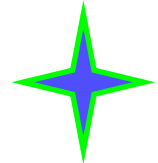
针状波束扫描方式

(a) 螺旋扫描; (b) 分行扫描; (c) 锯齿扫描

天线波束的扫描方法

1. 机械性扫描



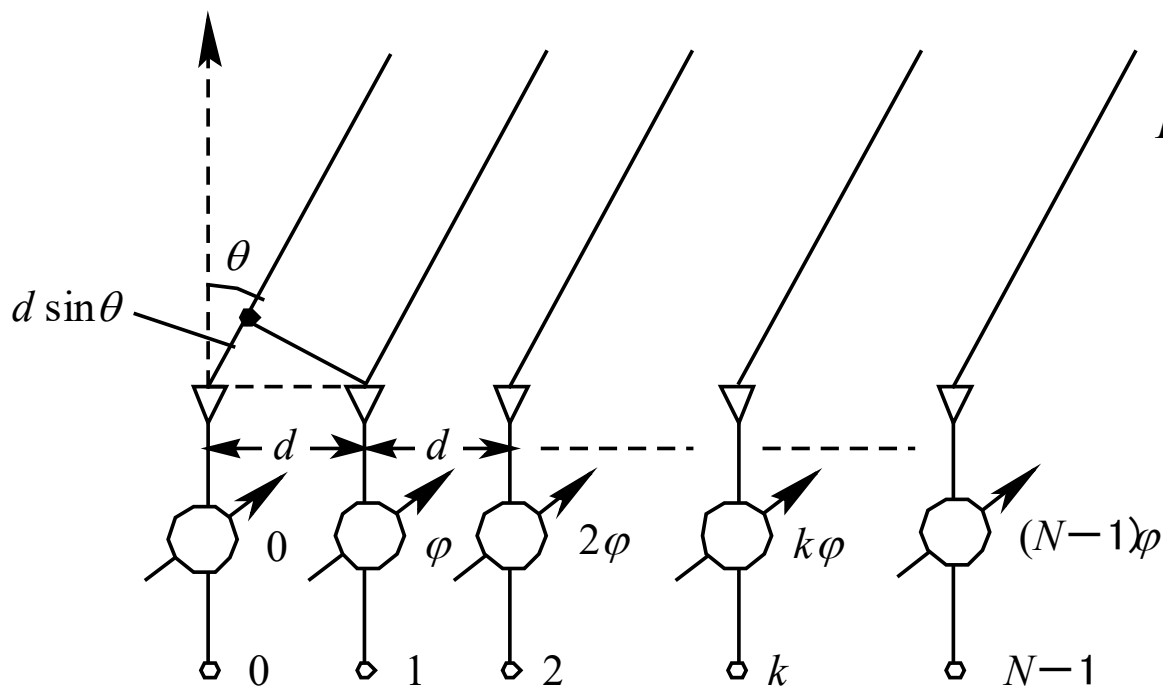


机械扫描特点：

简单，机械惯性大，扫描速度慢

2. 电扫描 (*Electronically Scanned Array Antennas, ESAs*)

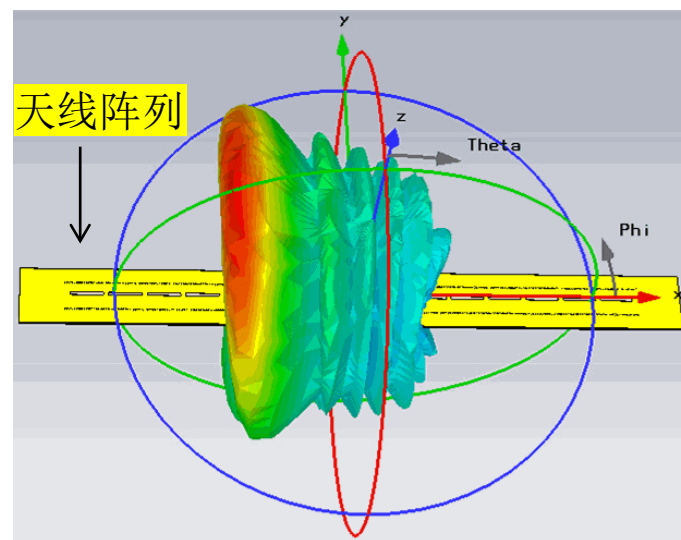
相位扫描法、频率扫描法、时间延迟法等。



N元直线移相器天线

相位扫描法

$$E(\theta) = E_0 + E_1 + \cdots + E_i + \cdots + E_{N-1}$$
$$= \sum_{k=0}^{N-1} E_k$$



相扫基本原理

相扫基本原理

□ 通过移相器改变各阵元激励相位，实现扫描

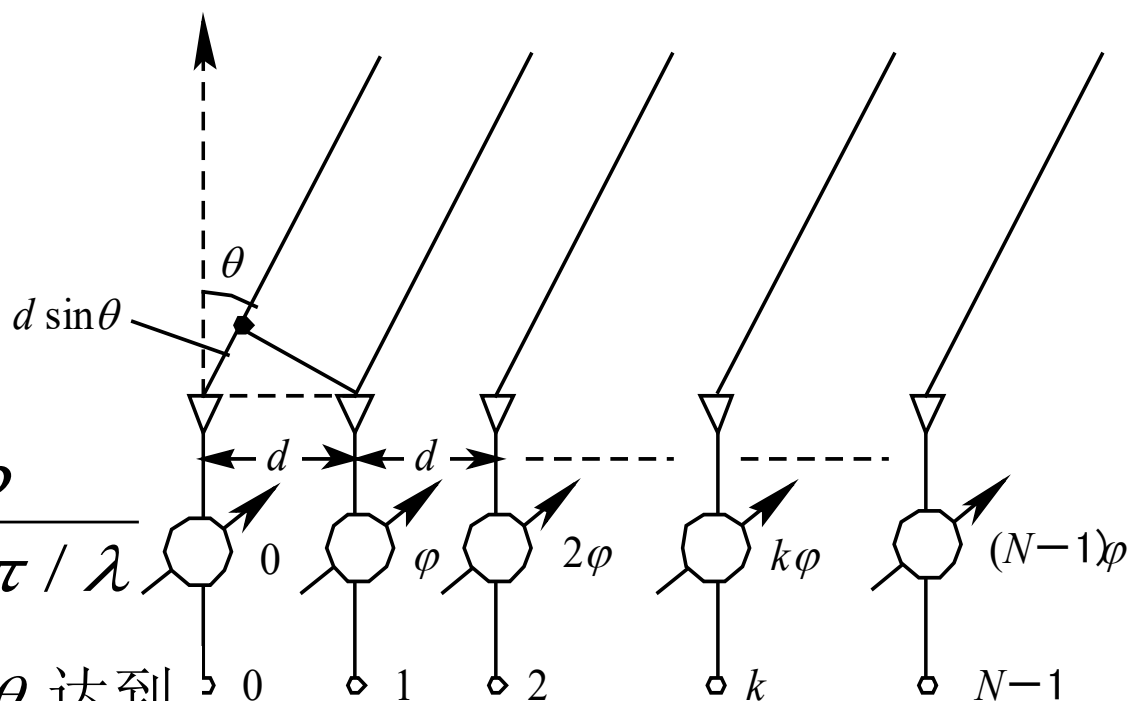
— 假定所有阵元

无方向性

等幅同相馈电

相邻阵元激励电
流相位差为 φ

$$\theta_0 = \sin^{-1} \frac{\varphi}{d \cdot 2\pi / \lambda}$$



目标：在期望的方向 θ_0 达到
各天线信号同相位叠加，其
它方向信号相消

N元直线相控阵天线

相扫基本原理

相扫基本原理（续）

- θ 方向远区某点辐射场的场强 $E(\theta)$ 为各天线阵元辐射的信号产生电磁场的矢量和
- 等幅馈电时，各阵元在该点辐射场的振幅为 E 。以0号阵元为相位基准，则

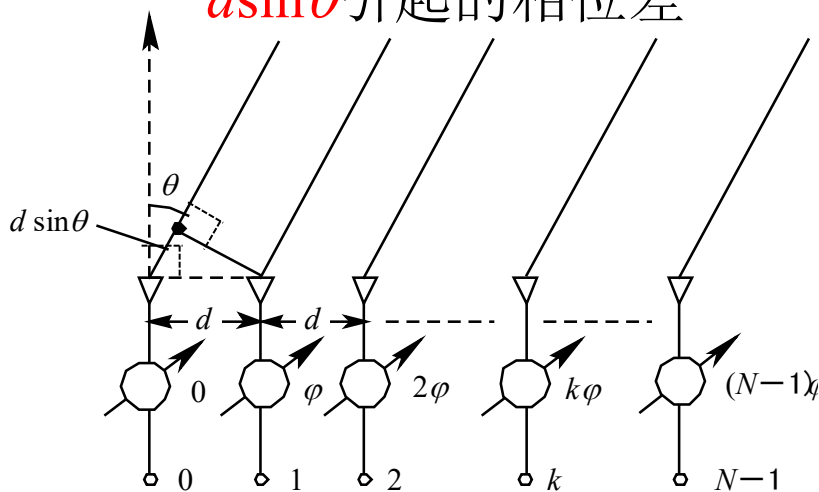
$$E_k = E e^{-jk\phi} e^{jk\psi}$$

第 k 个天线发射信号

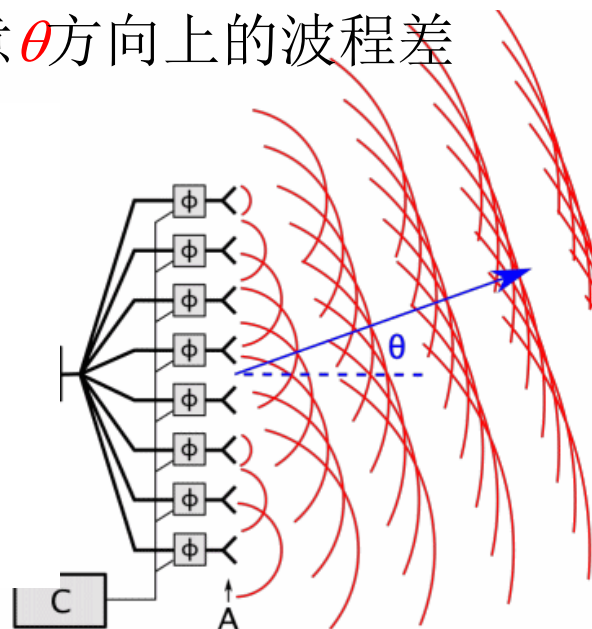
$$E(\theta) = E \sum_{k=0}^{N-1} e^{-jk\phi} e^{jk\psi} = E \sum_{k=0}^{N-1} e^{jk(\psi-\phi)} = E \frac{\sin\left[\frac{N}{2}(\psi-\phi)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2}(\psi-\phi)\right]} e^{j\left[\frac{N-1}{2}(\psi-\phi)\right]}$$

$\phi = 2\pi d \sin \theta_0 / \lambda$ $\psi = 2\pi d \sin \theta / \lambda$

- 式中 $2\pi d \sin \theta / \lambda$ 为相邻阵元的信号在任意 θ 方向上的波程差 $d \sin \theta$ 引起的相位差



目标：在期望的方向 θ_0 达到各天线信号同相位叠加，其它方向信号相消



相扫基本原理

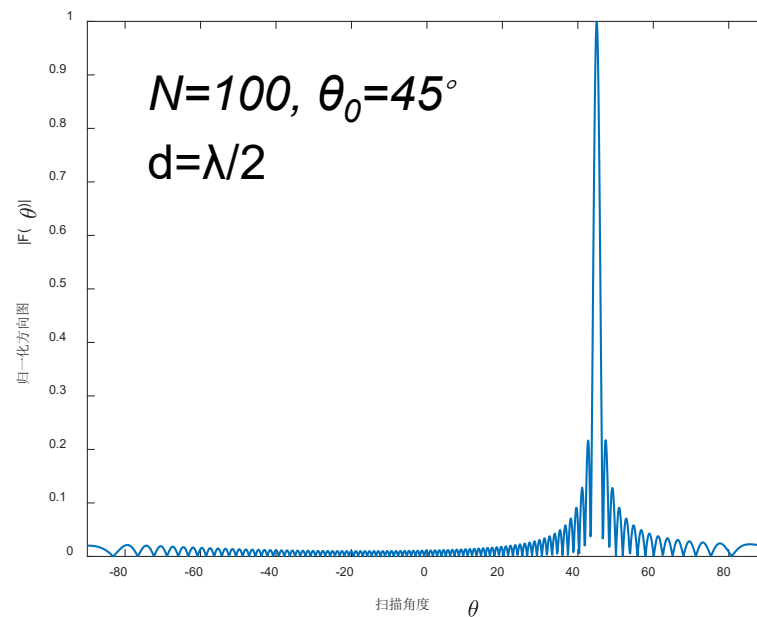
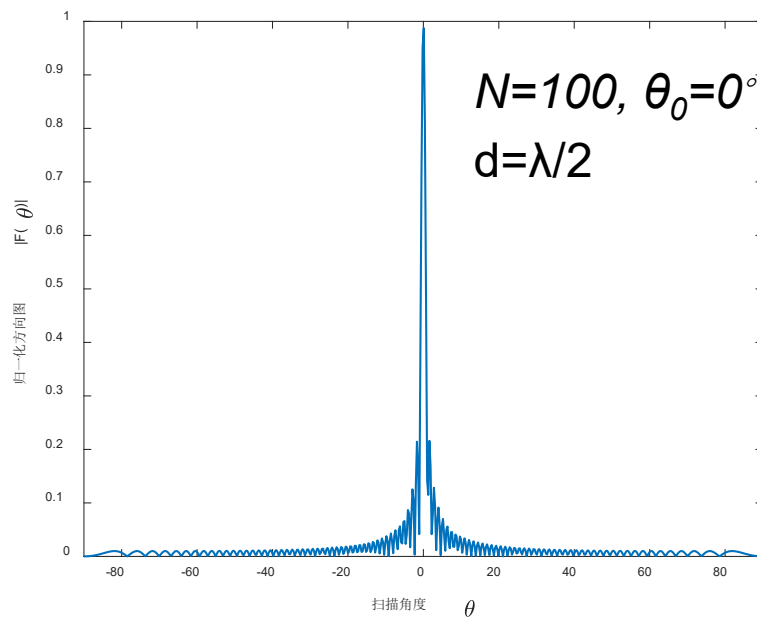
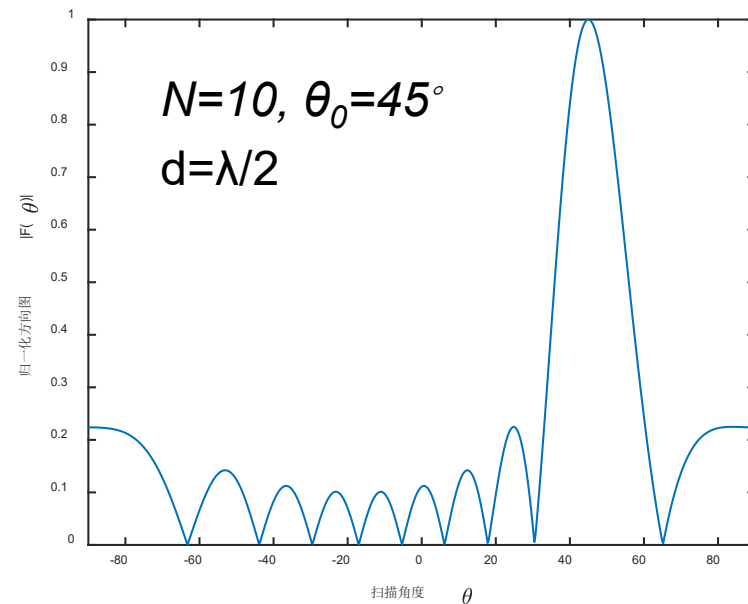
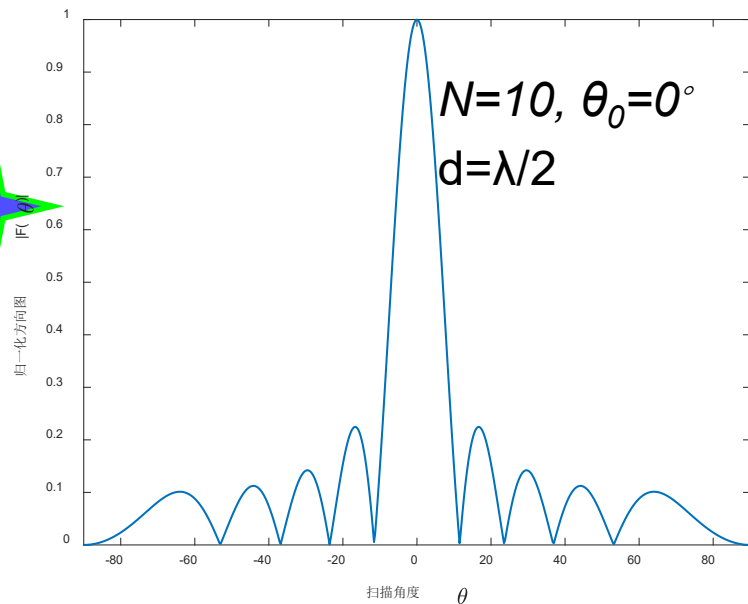
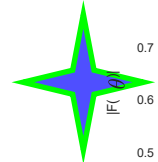
■ 相扫基本原理（续）

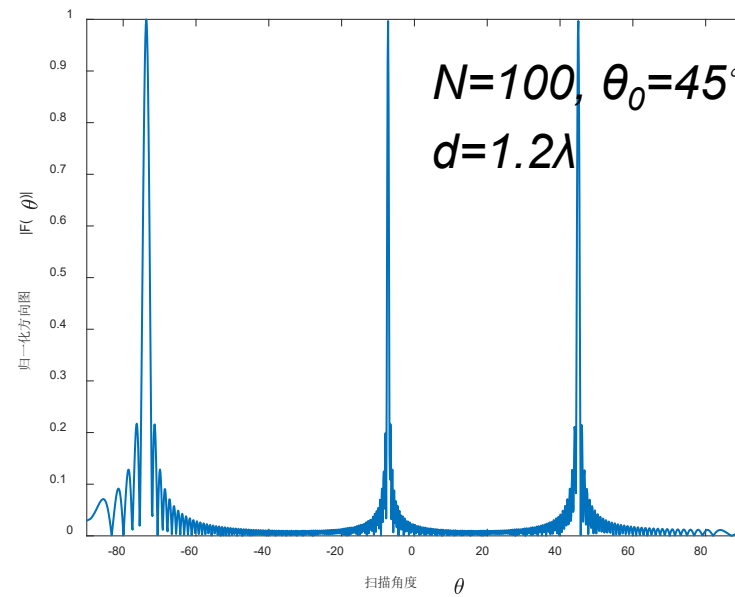
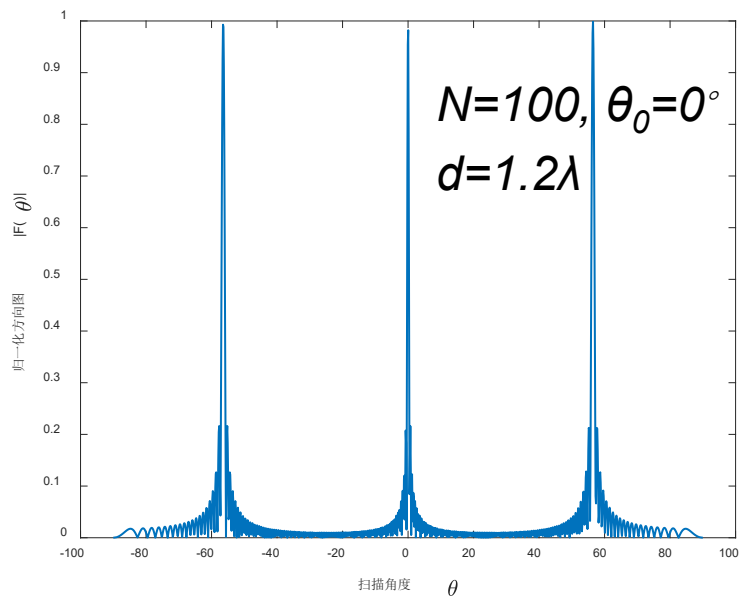
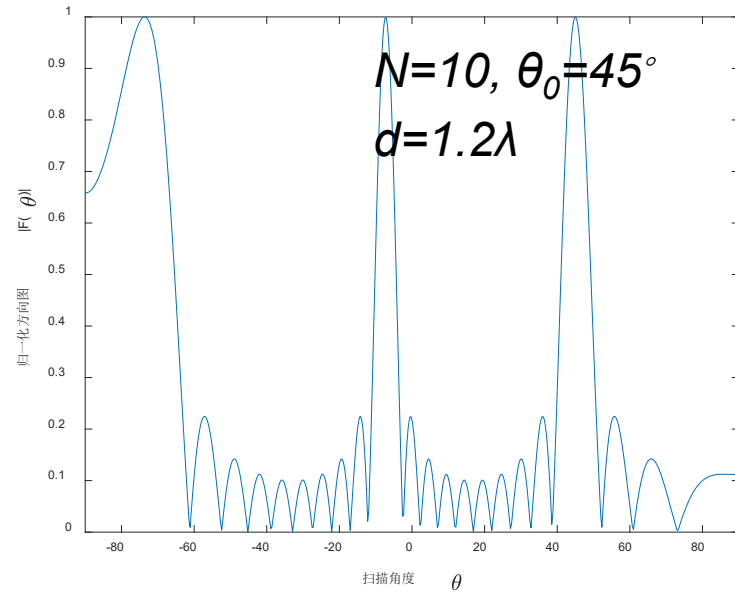
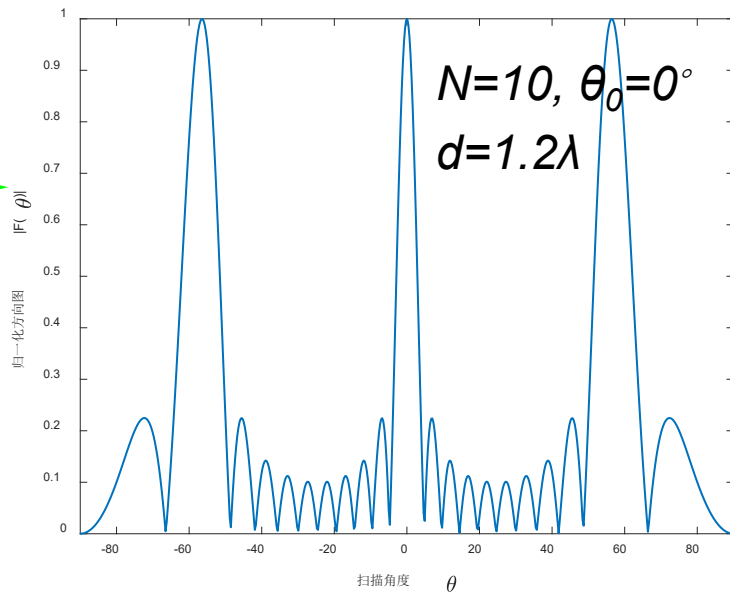
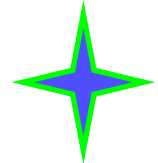
- 当 $\varphi = \psi$ 时，各分量同相相加，场强幅值最大

$$|E(\theta)|_{\max} = NE$$

- 定义归一化方向性函数为

$$\begin{aligned} F(\theta) &= \frac{|E(\theta)|}{|E(\theta)|_{\max}} \\ &= \left| \frac{1}{N} \frac{\sin\left[\frac{N}{2}(\psi - \varphi)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2}(\psi - \varphi)\right]} \right| = \left| \frac{1}{N} \frac{\sin\left[\frac{\pi Nd}{\lambda}(\sin \theta - \sin \theta_0)\right]}{\sin\left[\frac{\pi d}{\lambda}(\sin \theta - \sin \theta_0)\right]} \right| \end{aligned}$$





相扫基本原理

■ 相扫基本原理（续）

- 天线照射方向 θ_0 由移相器的相移量 φ 决定
- 在 θ_0 方向，各阵元辐射场由波程差引起的相位差正好抵消移相器引入的相位差，各分量同相相加获最大值， $F(\theta_0)=1$
- 改变 φ 值，就可改变波束指向角 θ_0 ，从而形成波束扫描
- 方向图最大值方向与同相波前垂直
- 由天线收发互易原理，接收天线，结论相同

2. 栅瓣问题

将 φ 与波束指向 θ_0 之间的关系式 $\varphi=(2\pi/\lambda)d \sin\theta_0$ 代入式

$$F(\theta) = \left| \frac{1}{N} \frac{\sin \left[\frac{N}{2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta - \varphi \right) \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta - \varphi \right) \right]} \right|$$

$$F(\theta) = \left| \frac{1}{N} \frac{\sin \left[\frac{\pi Nd}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]}{\sin \left[\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]} \right|$$

Note: Sidelobes, not shown, also repeat.

当 $(\pi Nd/\lambda)(\sin\theta - \sin\theta_0) = 0, \pm\pi, \pm2\pi, \dots, \pm n\pi$ (n 为整数)时, 分子为零, 若分母不为零, 则有 $F(\theta)=0$ 。而当 $(\pi d/\lambda)(\sin\theta - \sin\theta_0) = 0, \pm\pi, \pm2\pi, \dots, \pm n\pi$ (n 为整数)时, 上式分子、分母同为零, 由洛比达法则得 $F(\theta)=1$, 由此可知 $F(\theta)$ 为多瓣状。

Main Lobe

Grating Lobe

Grating Lobe

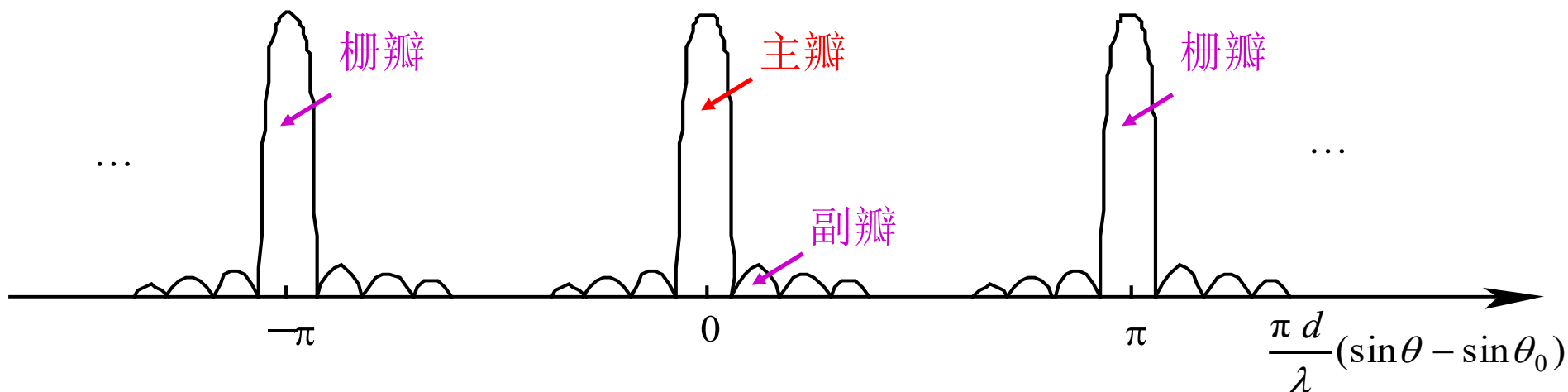
相扫基本原理

相扫基本原理（续）

$$F(\theta) = \left| \frac{1}{N} \frac{\sin \left[\frac{\pi N d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]}{\sin \left[\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]} \right|$$

□ 栅瓣问题

- 在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 内线阵单值测角条件： $d \leq \lambda / 2$
- 当 $d > \lambda / 2$ 时，在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 内将出现栅瓣
- 波束域（空域频谱）混迭现象：栅瓣是主瓣在其它方向上的再现，空间信号欠采样



相扫基本原理

■ 相扫基本原理（续）

■ 方向图函数

$$F(\theta) = \left| \frac{1}{N} \frac{\sin \left[\frac{\pi N d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]}{\sin \left[\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]} \right|$$

- 当 $(\pi N d / \lambda)(\sin \theta - \sin \theta_0) = 0, \dots, \pm n\pi$ （ n 为整数）时，分子为0，若分母不为0， $F(\theta) = 0$
- 当 $(\pi d / \lambda)(\sin \theta - \sin \theta_0) = 0, \dots, \pm n\pi$ （ n 为整数）时，分子分母同为0， $F(\theta) = 1$ ，即 $F(\theta)$ 可能出现多瓣

■ 相扫基本原理（续）

- 当 $\theta = \theta_0$ 时为主瓣，其余为栅瓣。只取一个周期 $-\pi \sim +\pi$

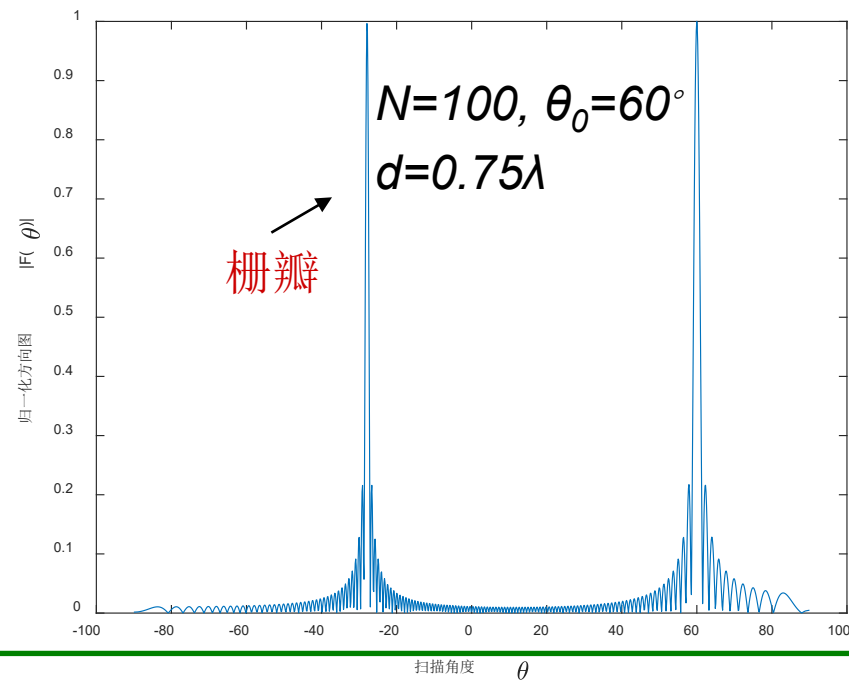
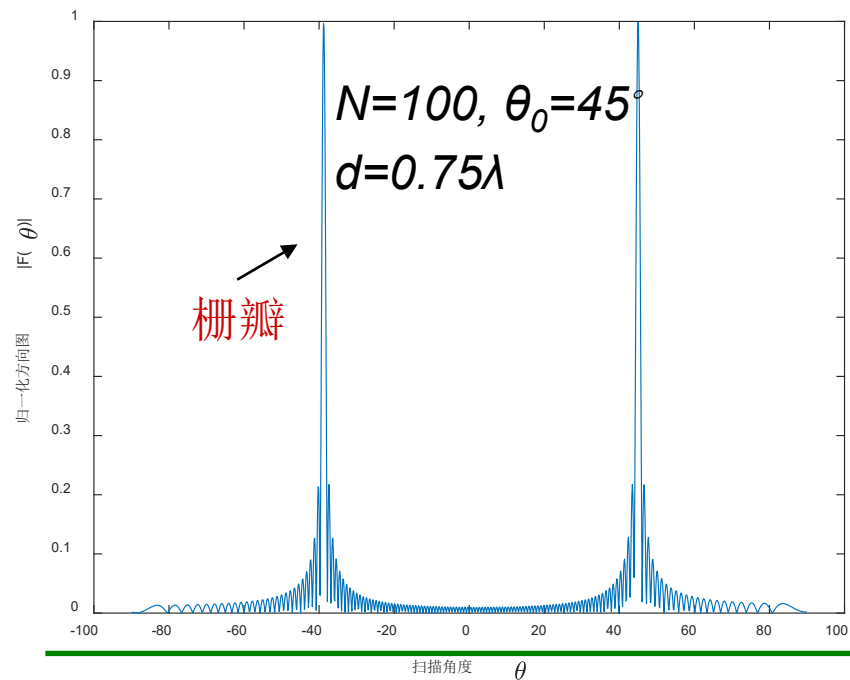
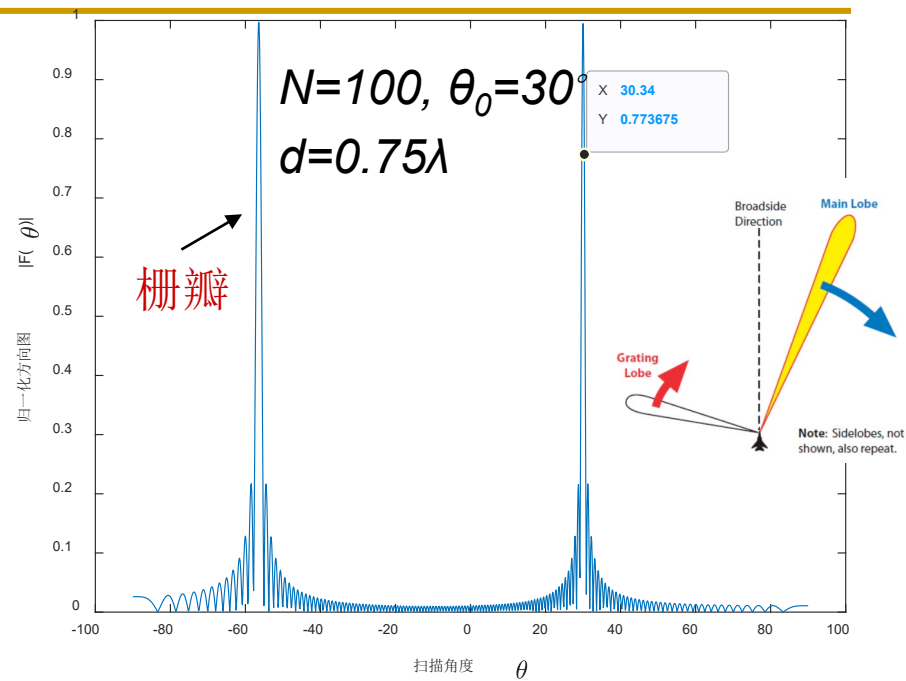
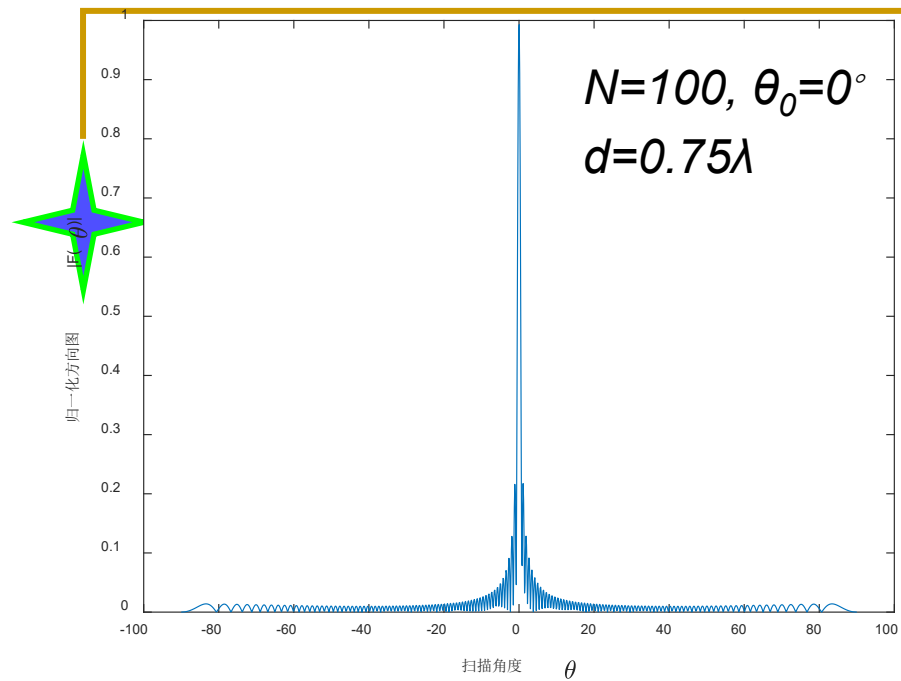
$$\left| \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right| \leq \pi \quad \Rightarrow \quad \frac{d}{\lambda} \leq \frac{1}{|\sin \theta - \sin \theta_0|}$$

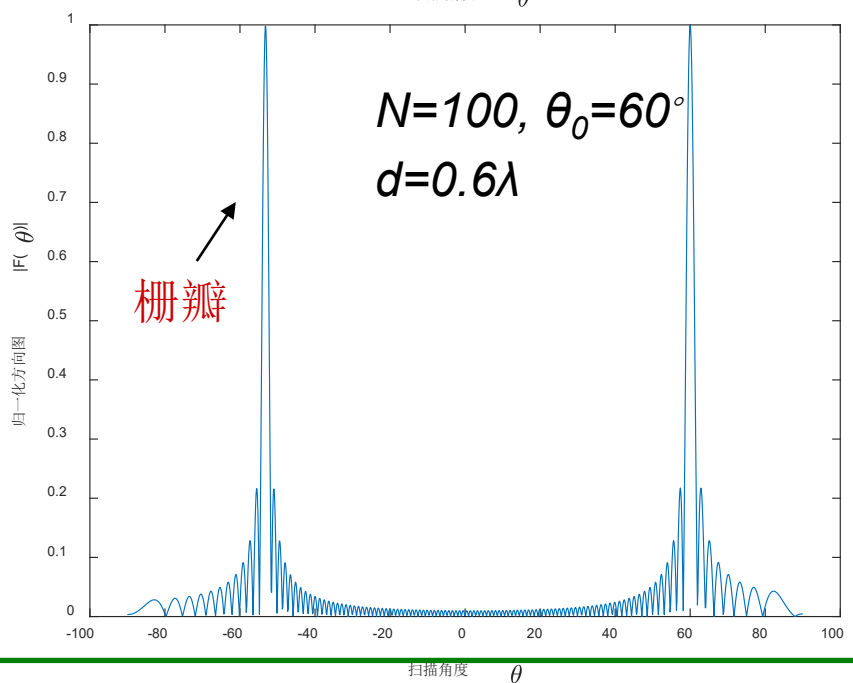
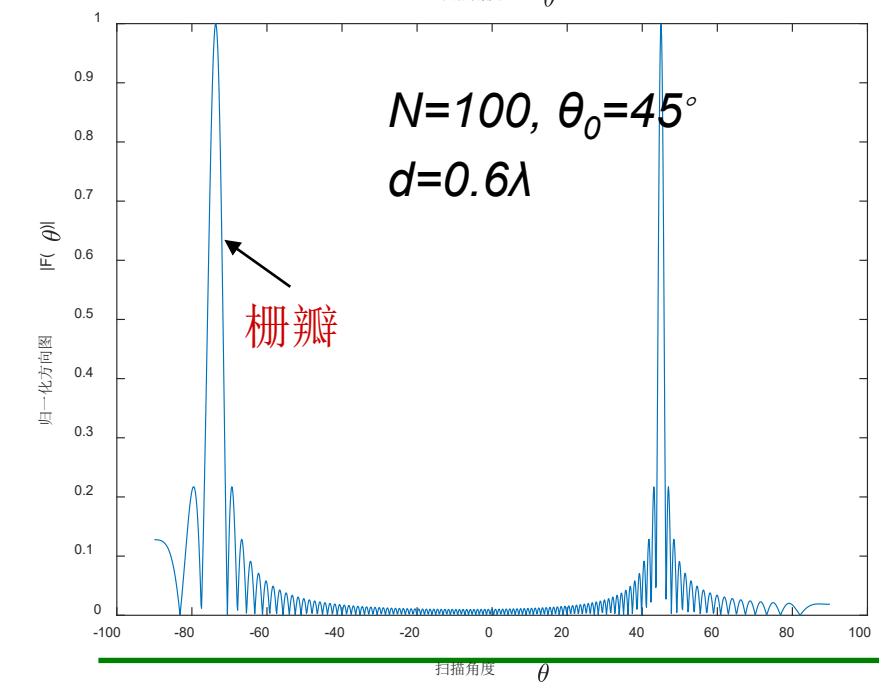
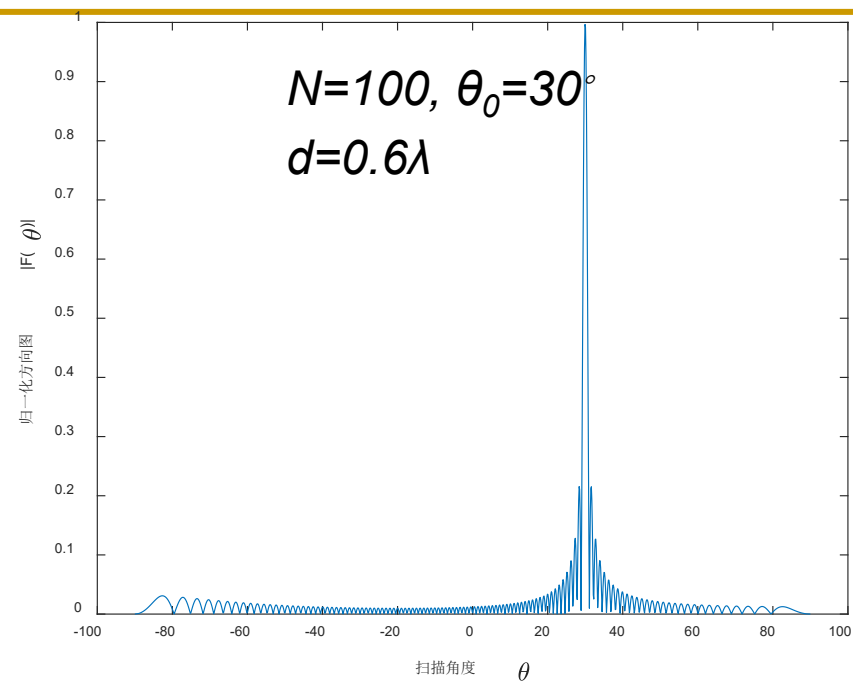
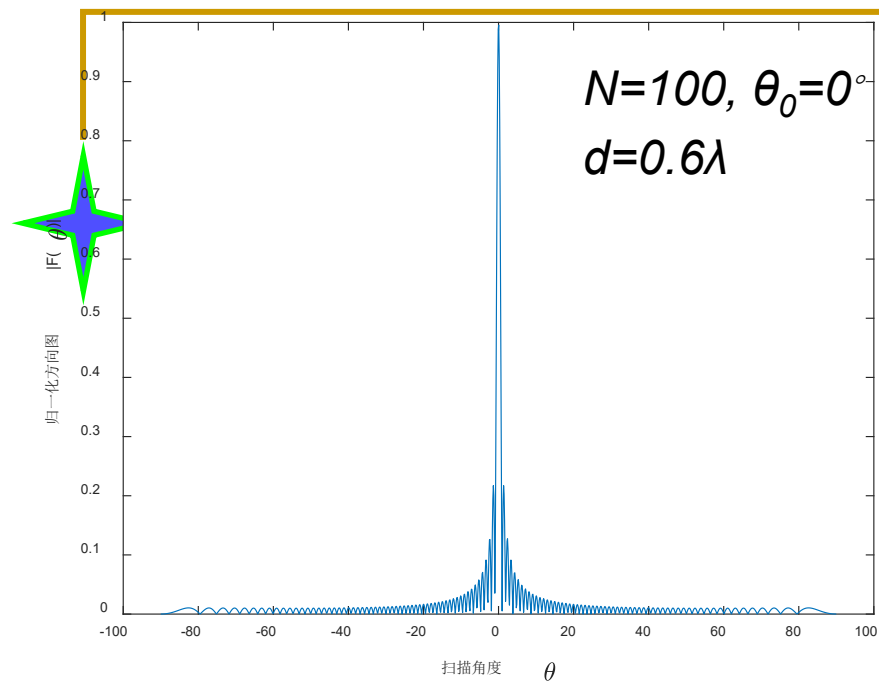
- 因 $|\sin \theta - \sin \theta_0| \leq 1 + |\sin \theta_0|$ ，则观测范围 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 无栅瓣条件

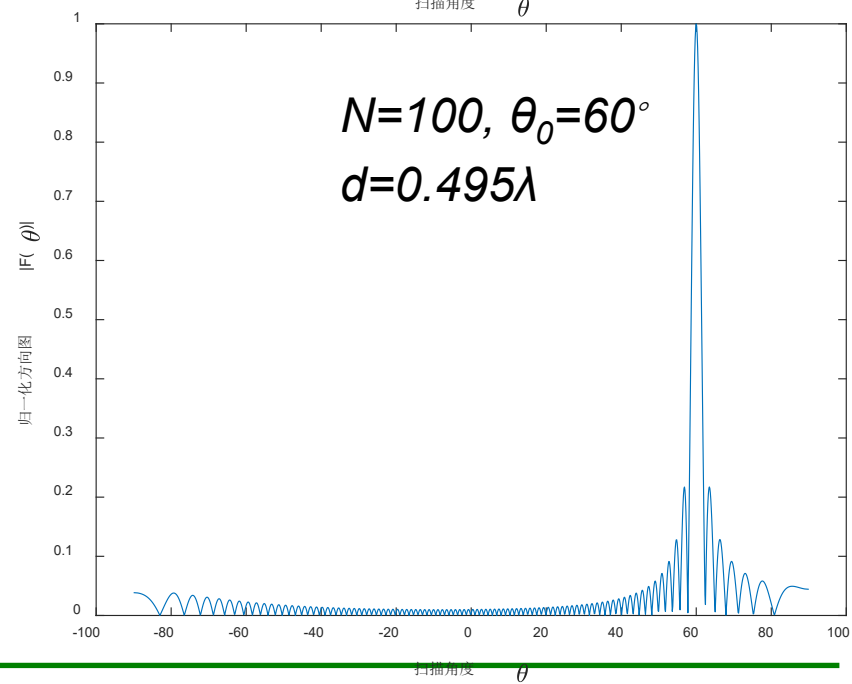
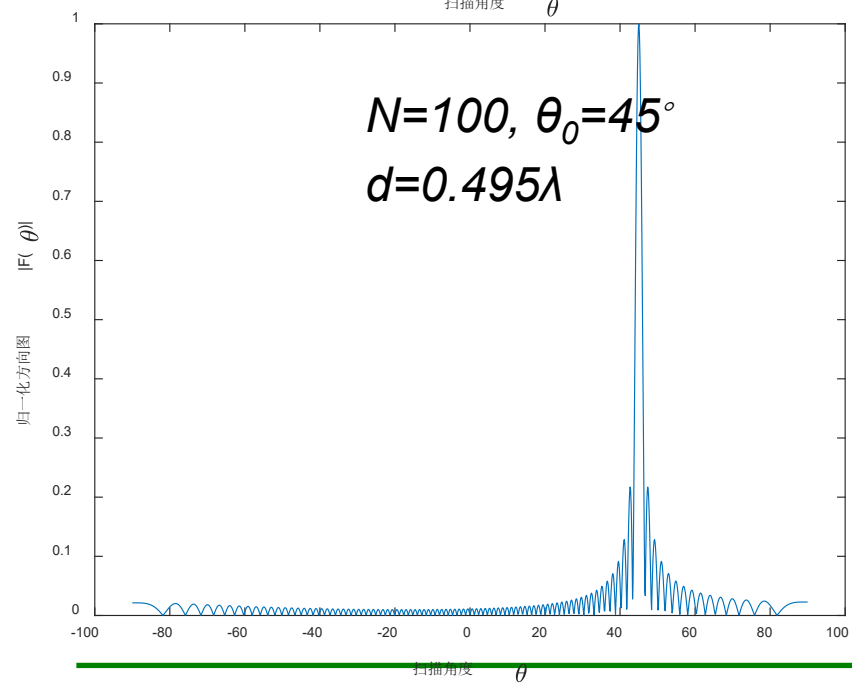
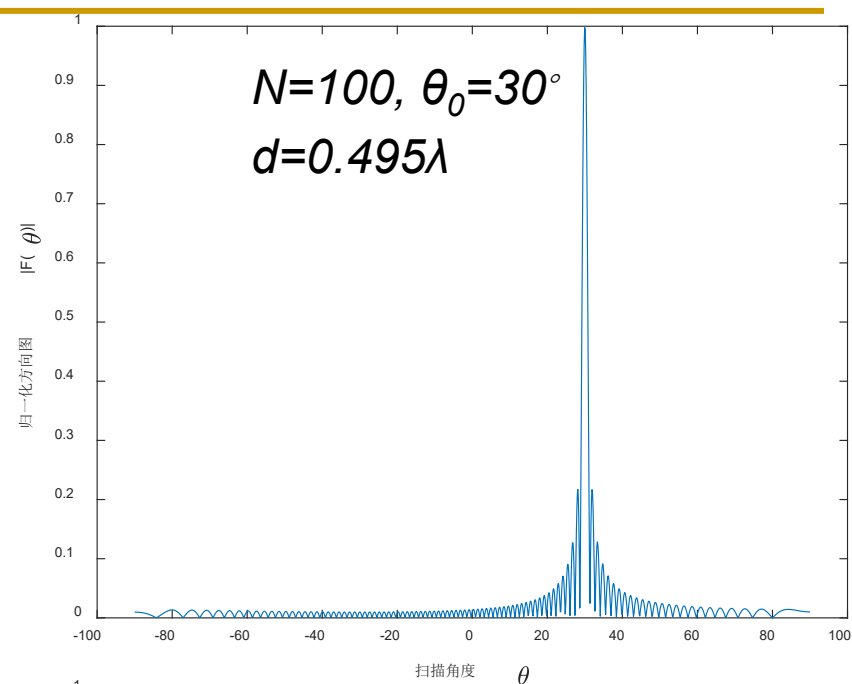
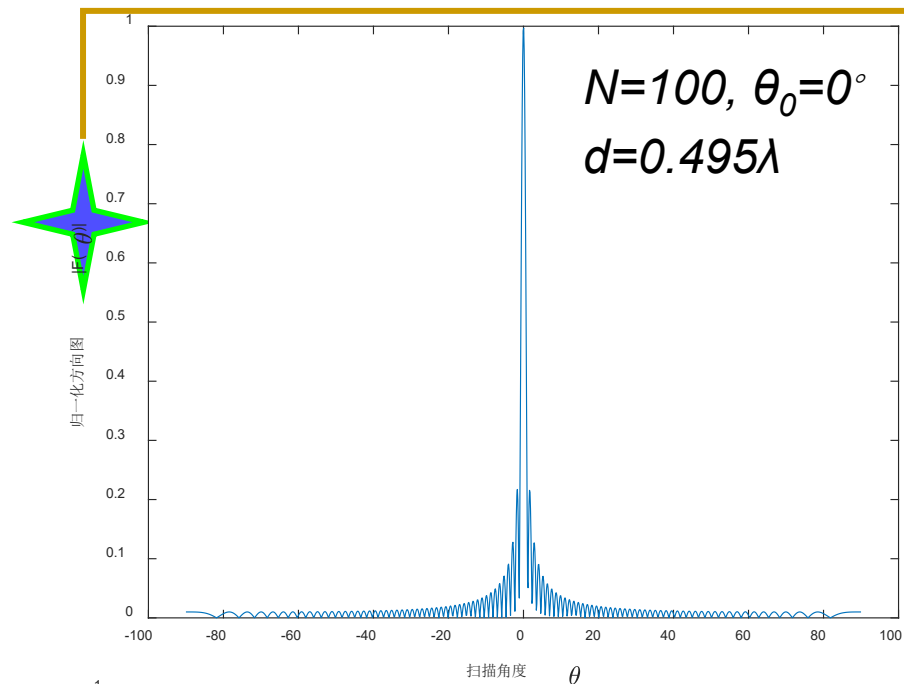
$$\frac{d}{\lambda} \leq \frac{1}{1 + |\sin \theta_0|} \leq \frac{1}{2} \quad \Rightarrow \quad d \leq \frac{\lambda}{2}$$

- 观测范围 $[-30^\circ, 30^\circ]$ 时， $d \leq \frac{\lambda}{1 + \frac{1}{2}} = \frac{2\lambda}{3}$

- 观测范围 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 时， $d \leq \frac{\lambda}{1 + \frac{\sqrt{2}}{2}}$







相扫基本原理

- 相扫基本原理（续）

- 波束宽度

- 波束指向法线方向，即 $\theta_0 = 0$ ，方向性函数

$$F(\theta) = \left| \frac{1}{N} \sin\left(\frac{N\pi}{\lambda} d \sin \theta\right) / \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta\right) \right| \approx \left| \text{sinc}\left(\frac{N\pi d}{\lambda} \sin \theta\right) \right|$$

- 得波束半功率（3dB）宽度

$$\theta_{0.5} \approx \frac{0.886}{Nd} \lambda (rad) \approx \frac{50.8}{Nd} \lambda (^\circ)$$

相扫基本原理

■ 相扫基本原理（续）

- 当 $d = \lambda/2$ 时，若要 $\theta_{0.5} = 1^\circ$ ，则需阵元 $N=100$

$$\theta_{0.5} \approx \frac{100}{N} (^\circ)$$

- 当波束指向 θ_0 任意时，在主瓣内 $\theta \approx \theta_0$ ，得

$$F(\theta) \approx \left| \frac{\sin \left[\frac{N\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]}{\frac{N\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0)} \right| = \left| \text{sinc} \left(\frac{N\pi d}{\lambda} \Delta \sin \theta_0 \right) \right|$$

相扫基本原理

■ 相扫基本原理（续）

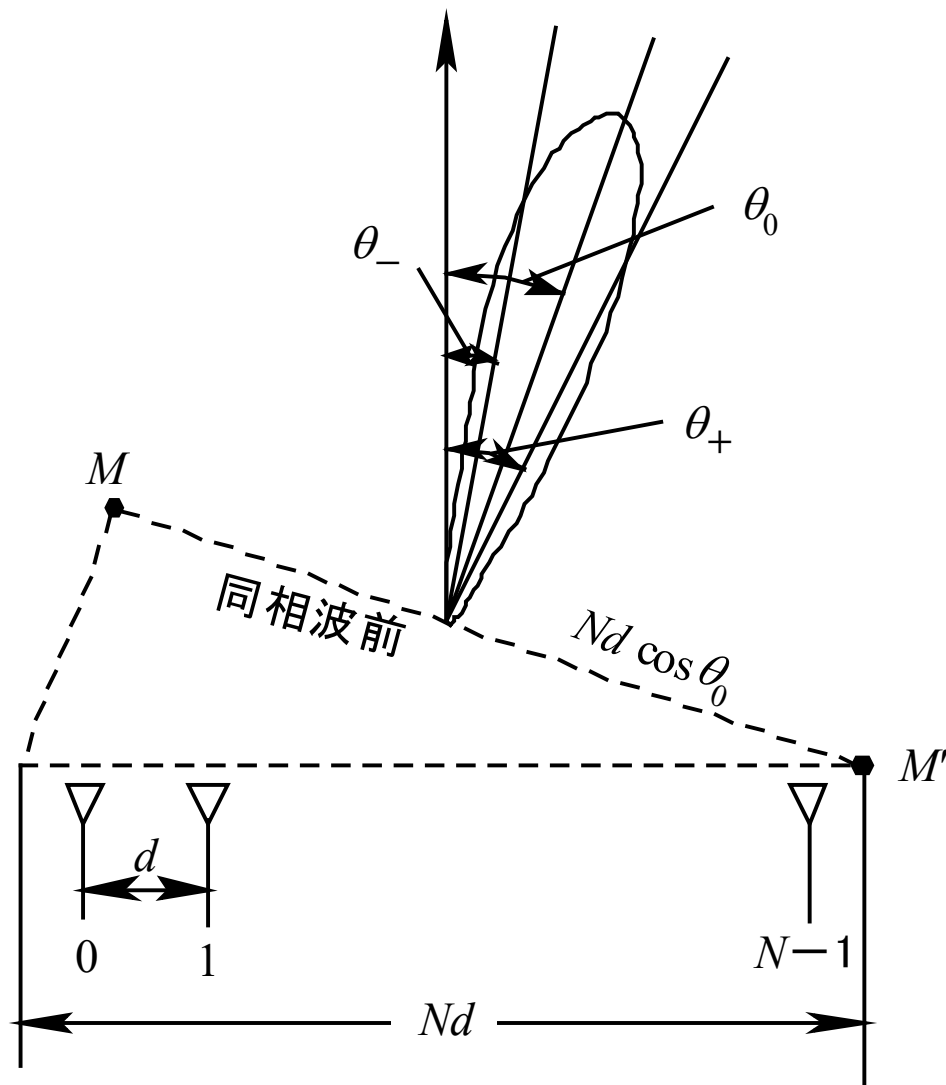
- 因 $\text{sinc}()$ 函数对参量 $\sin\theta_0$ 的主瓣宽度处处一致，即 $\Delta\sin\theta_0 = \text{常数} \approx \theta_{0.5}$ ，由微分 $\Delta\sin\theta_0 = \Delta\theta_0 \cdot \cos\theta_0$ ，得任意 θ_0 时的波束半功率宽度

$$\theta_{0.5s} = \Delta\theta_0 (3\text{dB 宽度}) = \frac{\theta_{0.5}}{\cos\theta_0}$$

- θ_0 越大，波束越宽，例 $\theta_0 = 60^\circ$ ， $\theta_{0.5s} \approx 2\theta_{0.5}$

相扫基本原理

- 相扫基本原理（续）
 - 波束总是指向同相馈电阵列天线的法线方向
 - 同相波前 MM' 的有效天线孔径为 $Nd \cos \theta_0$



扫描时的波束宽度

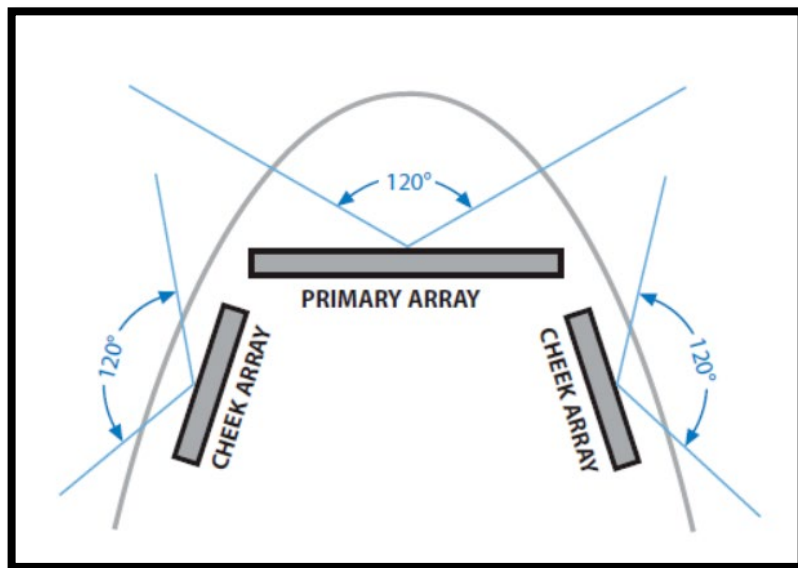
相扫基本原理

■ 相扫基本原理（续）

- 发射能量一定， $\theta_0 \uparrow$ ，波束 \uparrow ，天线增益 \downarrow
- 波束扫到 θ_0 方向，天线有效口径是真实口径在等相位面上的投影，对一维线阵有 $A_s = A \cos \theta_0$ ，尺寸减小，此时波束指向处的天线增益为

$$G(\theta_0) = \frac{4\pi A_s}{\lambda^2} = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \cos \theta_0$$

- 波束扫描角范围通常限制在 $\pm 60^\circ$ 或 $\pm 45^\circ$ 内。若要覆盖整个 360° ，一般要用三至四个天线阵



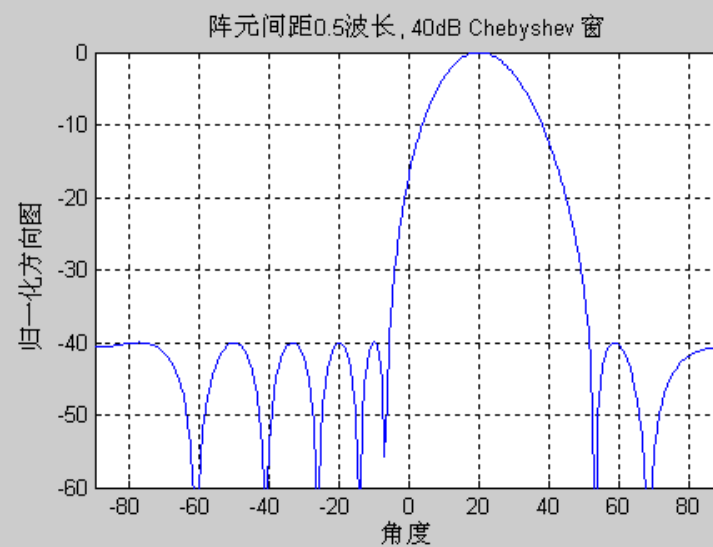
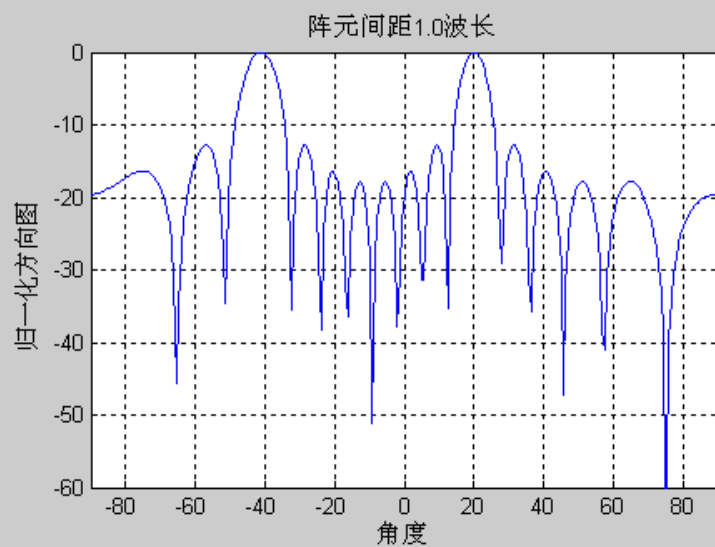
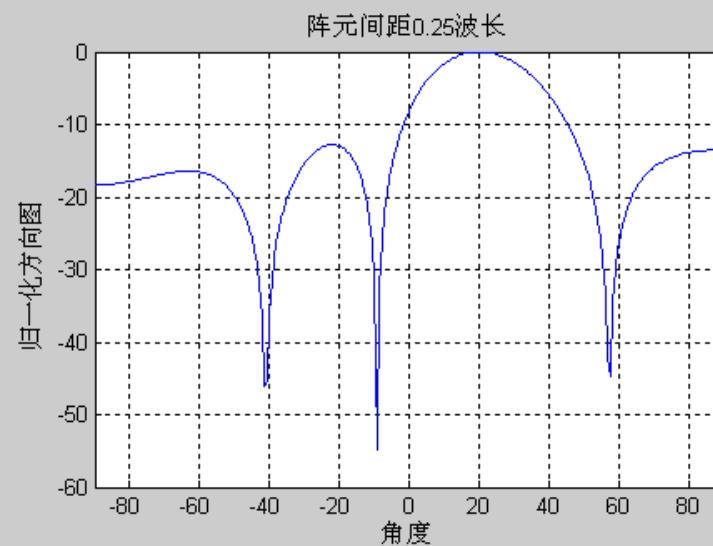
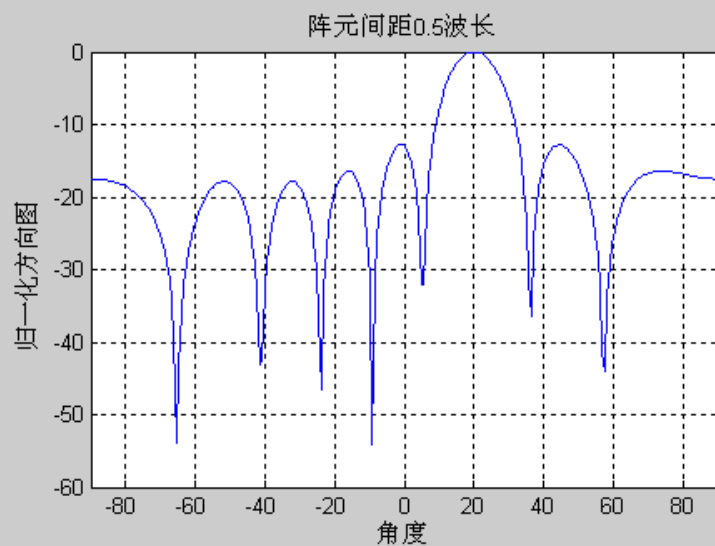
相扫基本原理

■ 相扫基本原理（续）

- 各阵元有指向性时，若所有阵元的阵元方向图 $F_e(\theta)$ 一致，则总的阵列天线方向图等于阵方向图 $F(\theta)$ 与阵元方向图 $F_e(\theta)$ 之积，即

$$F_N(\theta) = F_e(\theta) \cdot F(\theta)$$

- 等间距和等幅馈电的阵列天线副瓣较大(第一副瓣电平为-13dB)，常需“加权”降低副瓣
 - 振幅加权：中间阵元功率大，周围阵元功率小
 - 密度加权：中心阵元密度大，周围阵元密度小
 - 采用有方向性的阵元



相扫基本原理

- 相扫基本原理（续）

- 相扫天线的带宽

- 前面对相控阵的讨论只限于窄带信号, $B \ll f$
- 相控阵天线方向图 $F(\theta)$ 随载频 f 变化
 $f \uparrow \Rightarrow \lambda \downarrow \Rightarrow d > \lambda / 2 \Rightarrow F(\theta)$ 压缩, 出现栅瓣
- 波束指向 θ_0 时线阵孔径两端相位差

$$\psi = 2\pi D \sin \theta_0 / \lambda = 2\pi c D \sin \theta_0 / f$$

相扫基本原理

■ 相扫基本原理（续）

$$\psi = 2\pi D \sin \theta_0 / \lambda = 2\pi c D \sin \theta_0 / f$$

- 若 ψ 不变，则频率变化 δf 引起的波束指向变化 $\delta \theta$ 为

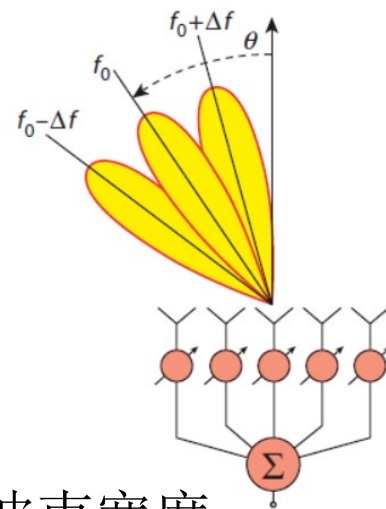
$$\delta \theta = -\delta f \tan \theta_0 / f$$

- 代入百分比带宽 $B_a(\%) = 2(\delta f / f) \times 100$ ，得

$$\frac{\delta \theta}{\theta_B(s)} = \pm 0.29 \frac{B_a(\%)}{\theta_B} \sin \theta_0$$

- 代入波束宽度 $\theta_B(s) = \theta_B / \cos \theta_0$ ， θ_B 为法线方向波束宽度

$$\delta \theta = \pm \frac{B_a(\%)}{200} \tan \theta_0 (rad) = \pm 0.29 B_a(\%) \tan \theta_0 (^\circ)$$



相扫基本原理

■ 相扫基本原理（续）

- 由于 $\delta\theta \leq \theta_B(s)$, θ_0 增大, 允许的带宽变小
- 天线孔径 \uparrow , 波束宽度 $\theta_B \downarrow$, 允许的 $B_a(\%) \downarrow$
- 天线指向 θ_0 时, 能量充填整个孔径所需时间为

$$T = D \sin \theta_0 / c$$

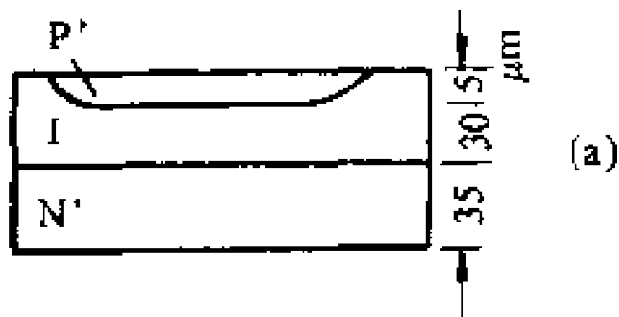
- 有效通过天线孔径的脉冲宽度 $\tau \geq T$, 得

$$B_a(\%) = \frac{\Delta B}{f} \times 100 = \frac{100\lambda}{c\tau} \leq \frac{100\lambda}{D \sin \theta_0} = \frac{2\theta_B(^{\circ})}{\sin \theta_0}$$

其中

$$\theta_B(^{\circ}) = 50.8\lambda / D$$

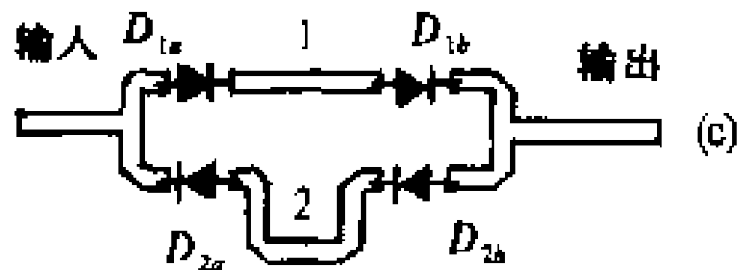
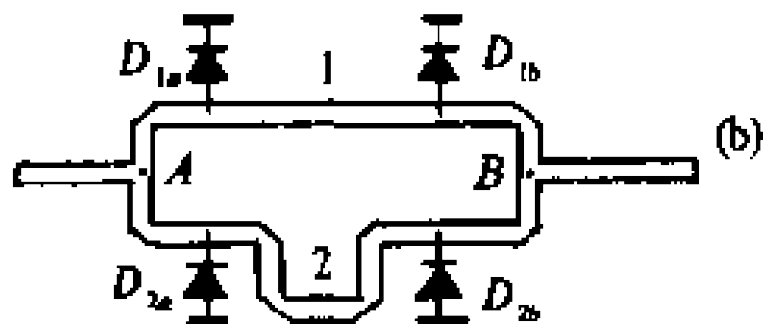
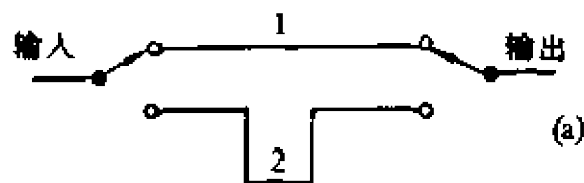
移相器



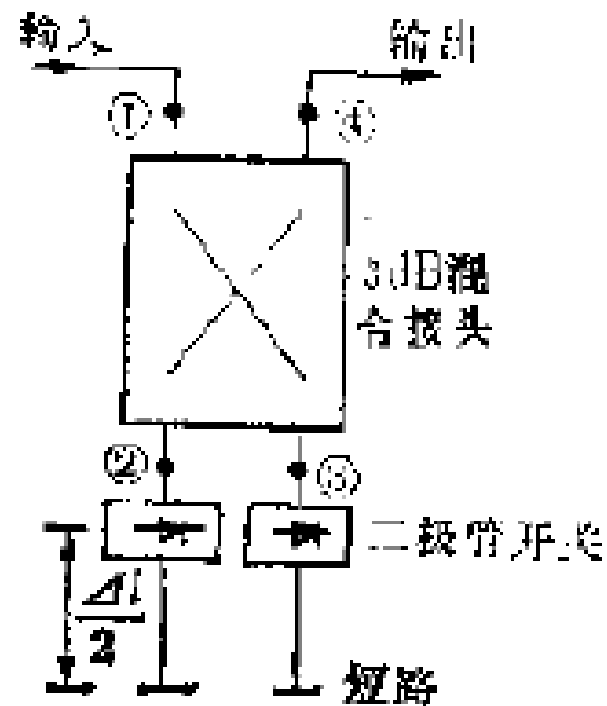
- (1) PIN二极管移相器
- 利用PIN二极管正反偏压下的阻抗变化配以一定电路可以实现不同的相移量。
- 特点：相移速度快，重量轻，体积小，设计灵活。
- 类型：模拟和数字。
- (1) 开关型 (2) 负载型 (3) 反射型

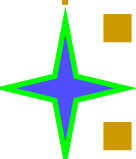
■ 开关型原理:

- 利用PIN二极管的通断, 改变微波信号的传输路径, 取得不同的相位延时。



- 3dB定向耦合器型
- 相移量很大，设计自由





■ 负载型

- 利用PIN管正向反向偏置时不同的阻抗形成移相。
- 带宽比开关型要大，但是随着相移量的增加，其带宽会显著降低，不能用于大角度相移。

PIN移相器的总体特点：频带较窄，插损大



■ (2) 铁氧体移相器

其基本原理是利用外加直流磁场改变波导内铁氧体的导磁系数，因而改变电磁波的相速，得到不同的相移量。

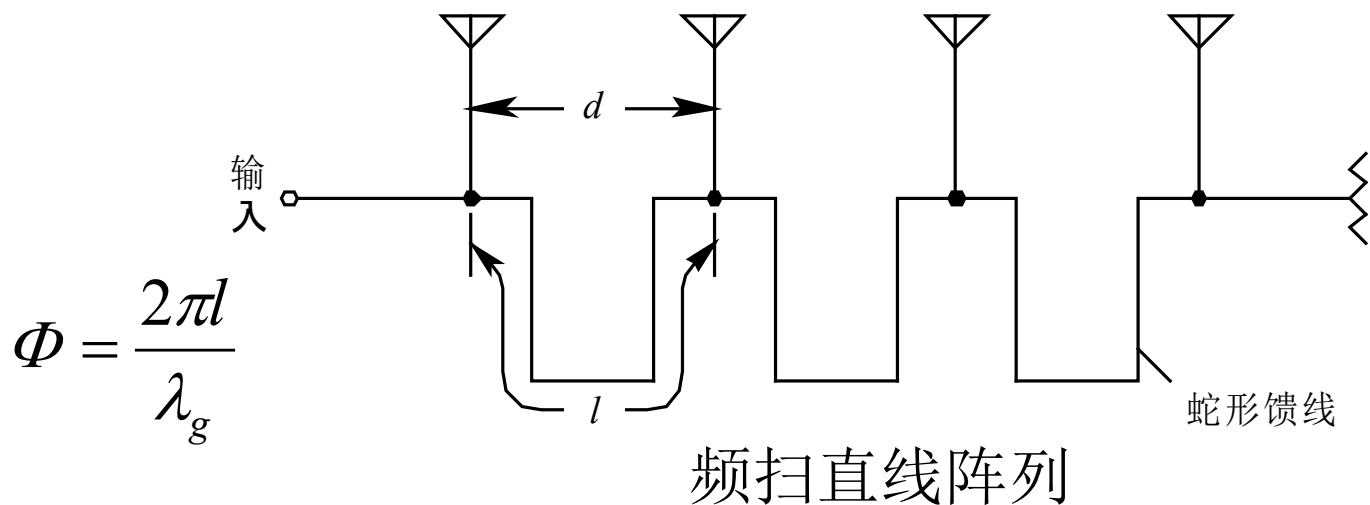
主要特点：

承受功率高，插入损耗较小，带宽较宽，但是所需的激励功率较大，响应时间长，较为笨重。

(3) 数字移相器


移相量不连续，便于控制。

■ 频率扫描



改变输入信号频率 f , 则 λ_g 改变, Φ 也随之改变, 故可实现波束扫描。

这里用具有一定长度的传输线代替了相扫法串联馈电中插入主馈线内的移相器, 因此插入损耗小, 传输功率大, 同时只要改变输入信号的频率就可以实现波束扫描, 方法比较简便。



通常 l 应取得足够长,这对提高波束指向的频率灵敏度有好
处,所以 Φ 值一般大于 2π

$$\Phi = \frac{2\pi l}{\lambda_g} = 2\pi m + \varphi$$

式中, m 为整数; $|\varphi| < 2\pi$ 。

所有阵元同相馈电,上式中, $\varphi=0$,由此可以确定

$$m = \frac{l}{\lambda_{g0}}$$

若 $\theta_0 \neq 0$, 即波束偏离法线方向, 则当 $\theta = \theta_0$ 时, 相邻阵元之间由波程差引起的相位差正好与传输线引入的相位差相抵消, 故有

$$\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_0 = \varphi = \frac{2\pi l}{\lambda_{g0}} - m2\pi$$

得

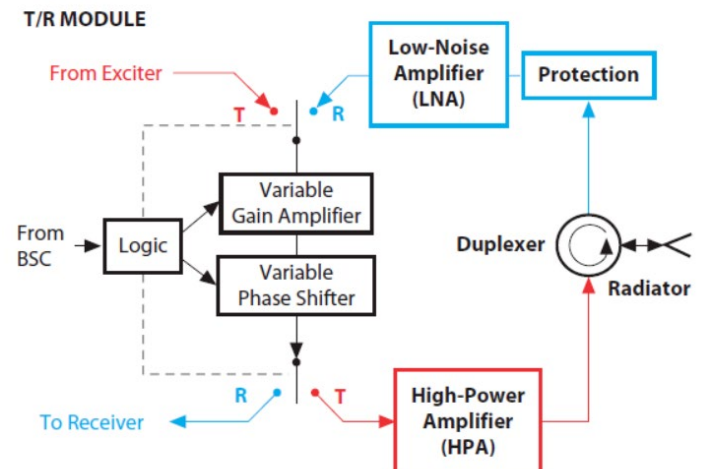
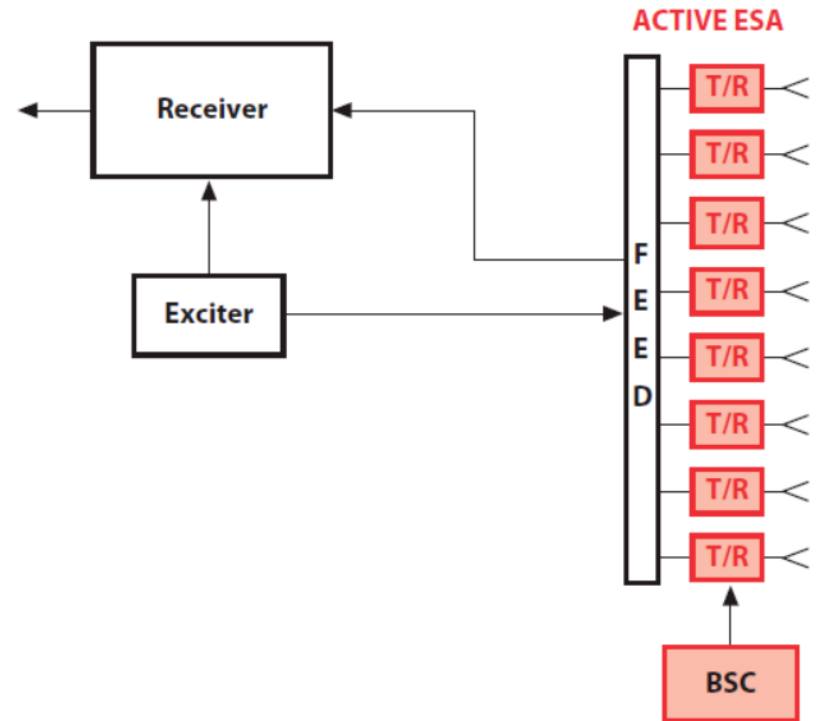
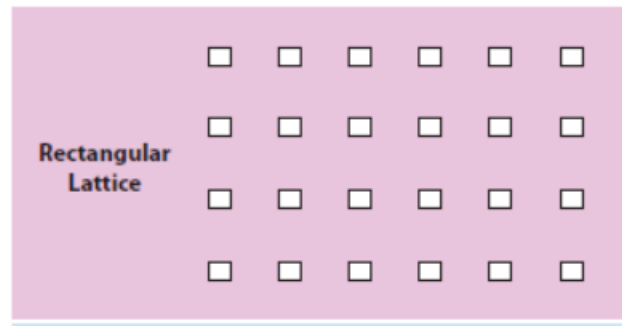
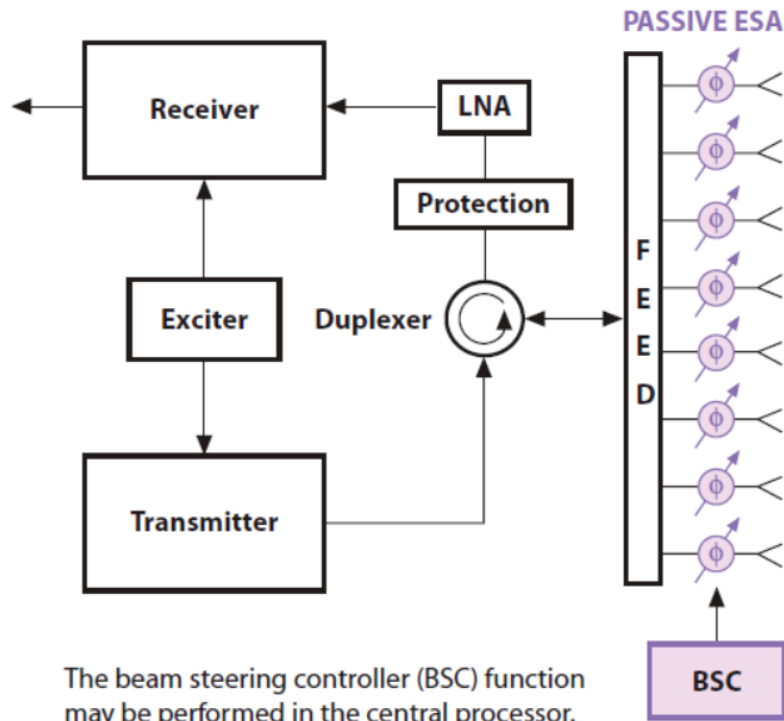
$$\sin \theta_0 = \frac{\lambda}{d} \left(\frac{l}{\lambda_g} - m \right) \quad (7.3.20)$$

式中, d 为相邻阵元间距; λ 为自由空间波长(相应输入端信号频率为 f)。已知 λ (或 f), 并算出 λ_g , 由式(7.3.20)可确定波束指向角 θ_0 。 λ_g 根据传输线的特性及工作波长而定。

相控阵雷达简介

■ 相控阵雷达简介

- 相位控制阵列：多个天线单元排成，各阵元馈电相位按一定程序灵活控制，完成特定的空间扫描
- 优点：
 - 相扫，无机械惯性、**快速波束捷变**
 - 多目标、远距离、高数据率、**高可靠性**
 - 多功能、多波束、自适应抗干扰
 - **减少天线的RCS**、共形天线阵列
- 缺点：
 - 波束宽度随扫描方向变化，需多个阵列覆盖实现大空域覆盖
 - 波束指向的稳定性



- 相控阵雷达简介（续）
 - 移相器控制波束的发射与接收
 - 无源阵：收发共用一个或几个发射机和接收机
 - 有源阵：每个阵元都连有可提供所需辐射功率的收发（T/R）固态组件，即都是有源的
 - 固态组件的功率源是低功率的
 - 各阵元辐射功率在空间进行合成
 - 各阵元辐射信号间相位关系固定，即相参
 - 各阵元的相位和振幅分布可按要求控制

■ 相控阵雷达简介（续）

□ 有源阵的优点：

- 功率源直接联在阵元后面，馈源和移相器的损耗不影响雷达性能；接收机噪声系数由T/R组件中的低噪声放大器决定
- 阵元馈源和移相器功率容量低，轻便廉价
- 大量低功率固态源取代易损坏的高电压、大功率发射机，系统可靠性提高
- 固态阵和数字波束形成及阵列信号处理技术相结合，天线性能改善潜力大

相控阵雷达简介

■ 相控阵雷达简介（续）

- 移相器：实现相扫的关键器件

- 对移相器的要求：

- 移相精确、性能稳定、频带和功率容量大、便于快速控制、激励功率和插入损耗小、体积小、重量轻等

- 移相器的种类：

- PIN二极管移相器、铁氧体移相器、数字式移相器等

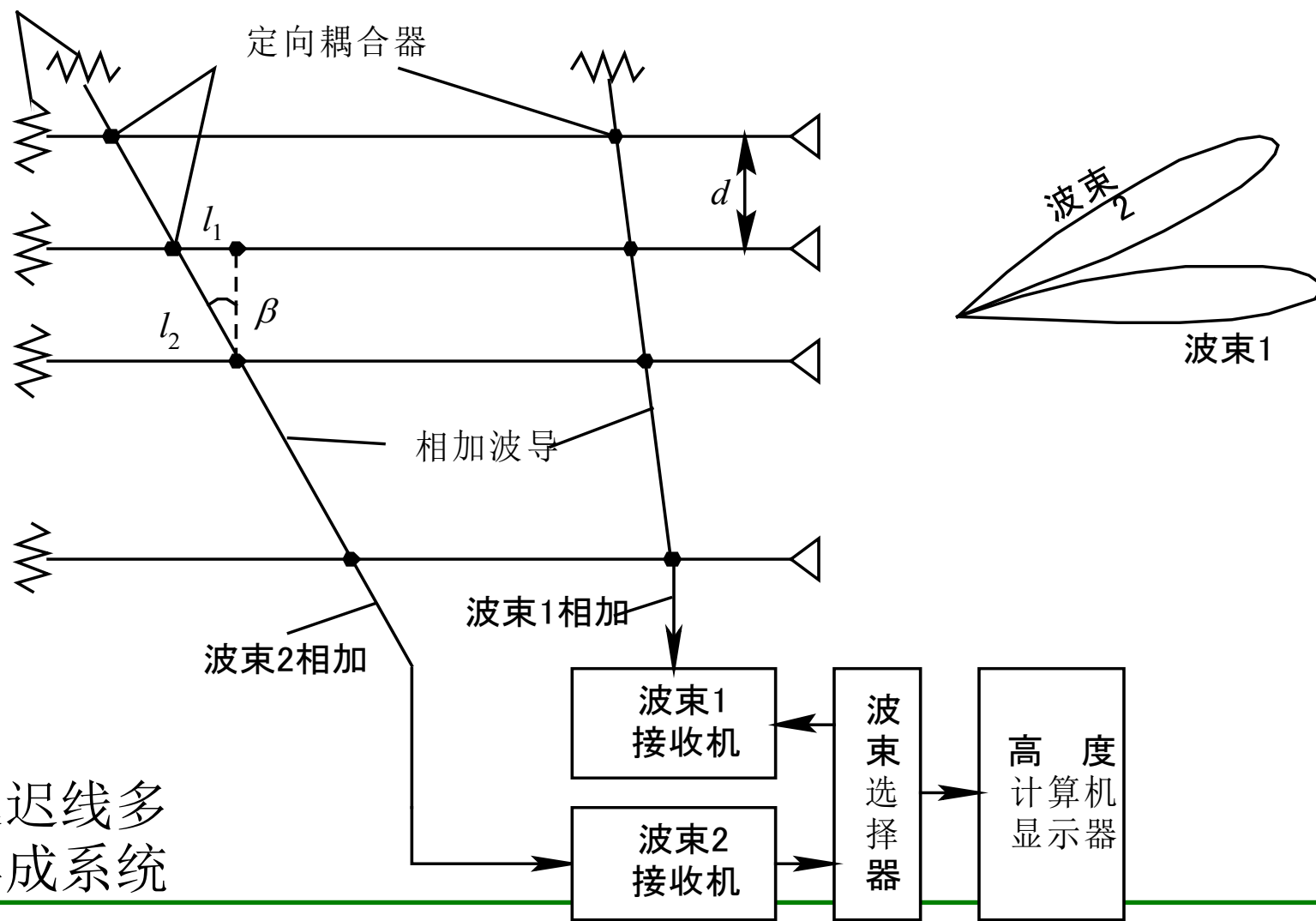
多波束形成技术

■ 多波束形成技术

- 收发都用多波束
- 接收多波束，发射宽波束，收发覆盖相同空域
- 接收多波束用得较多，因为：
 - 功率弱，技术上易实现，控制和处理灵便
- 多波束形成方法
 - 射频延迟线、中频延迟线、移相法、脉内频扫、数字波束形成（DBF）

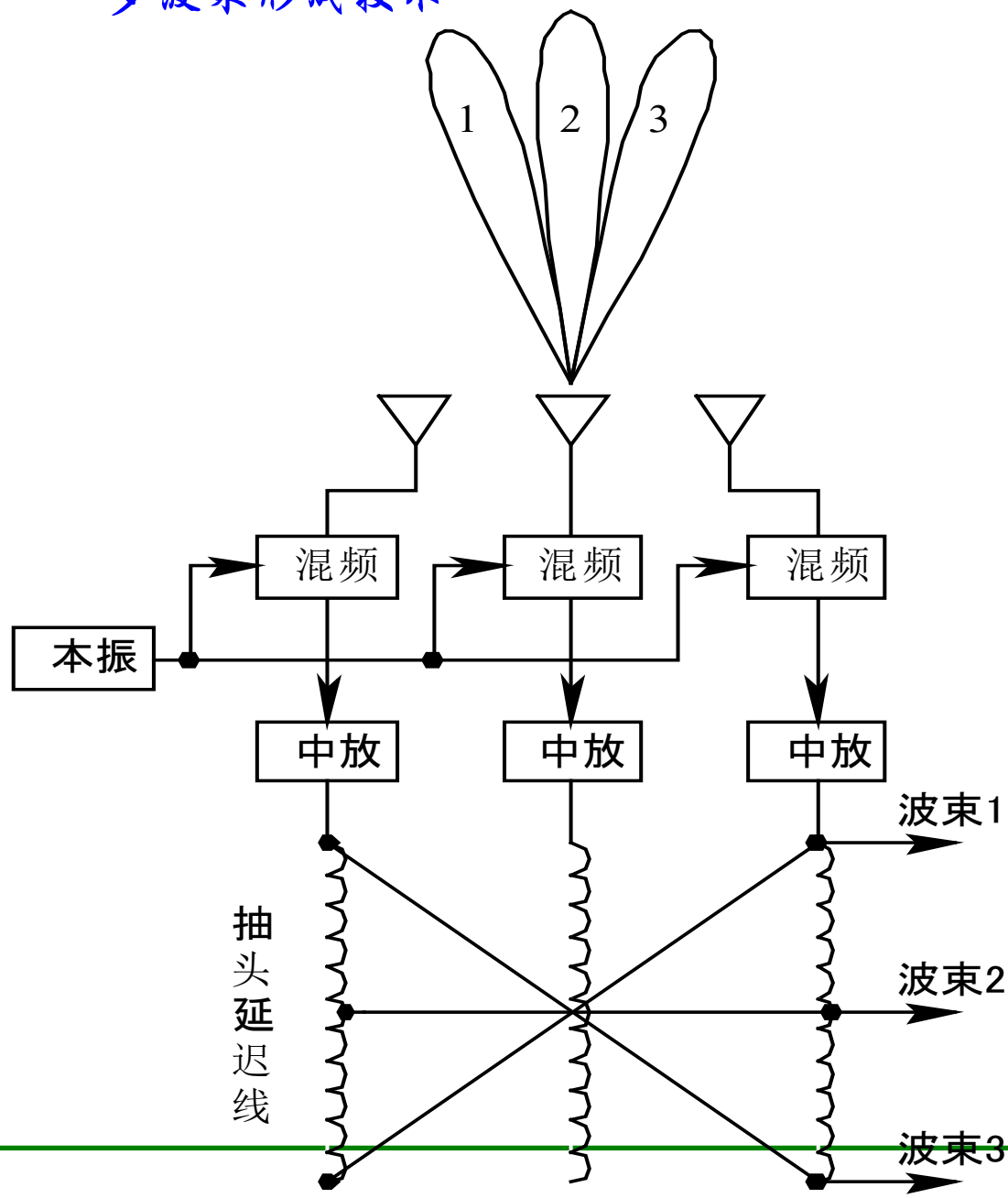
多波束形成技术

■ 多波束形成技术（续）



多波束形成技术

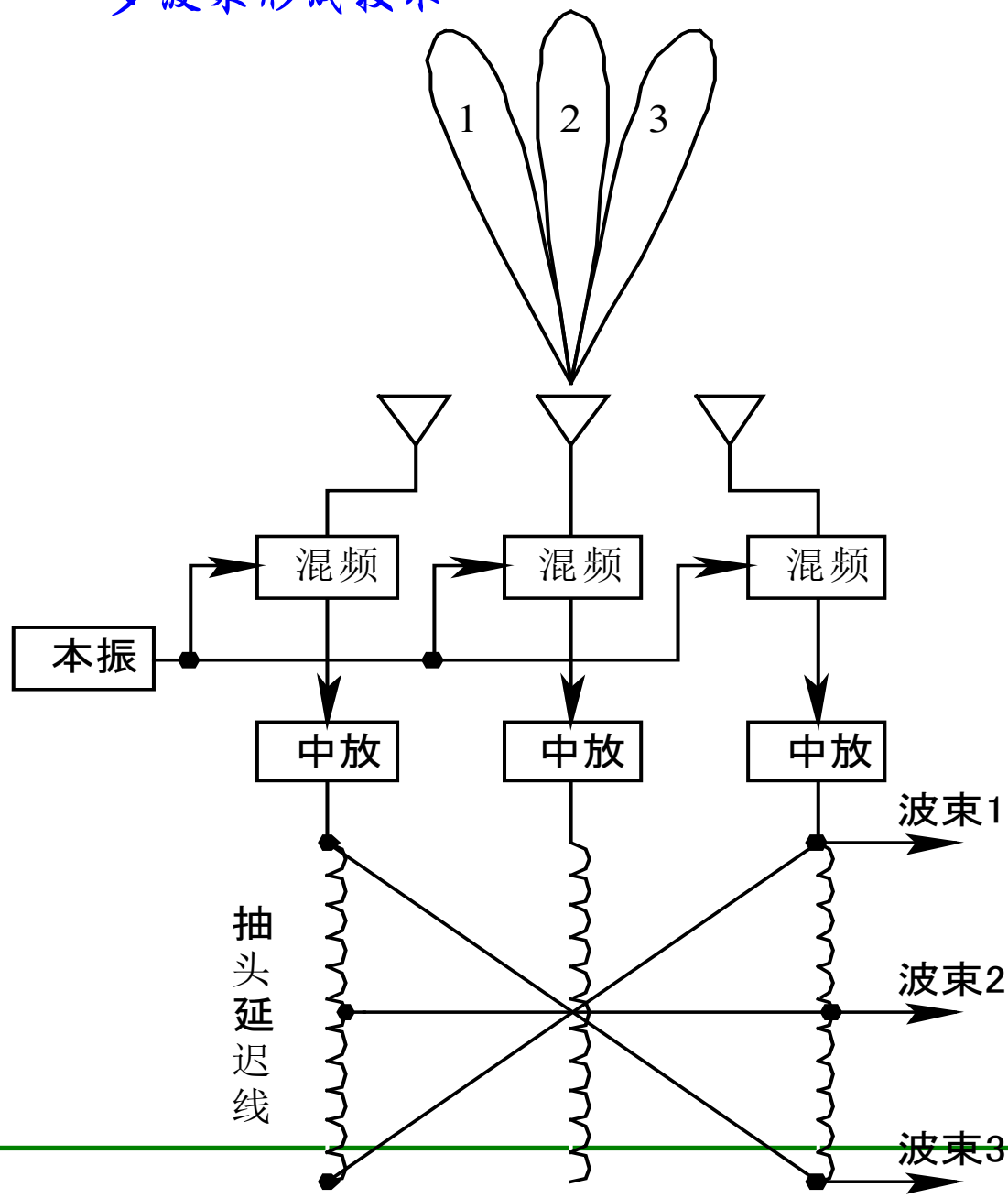
■ 多波束形成技术（续）



中频延迟多波束形成系统

多波束形成技术

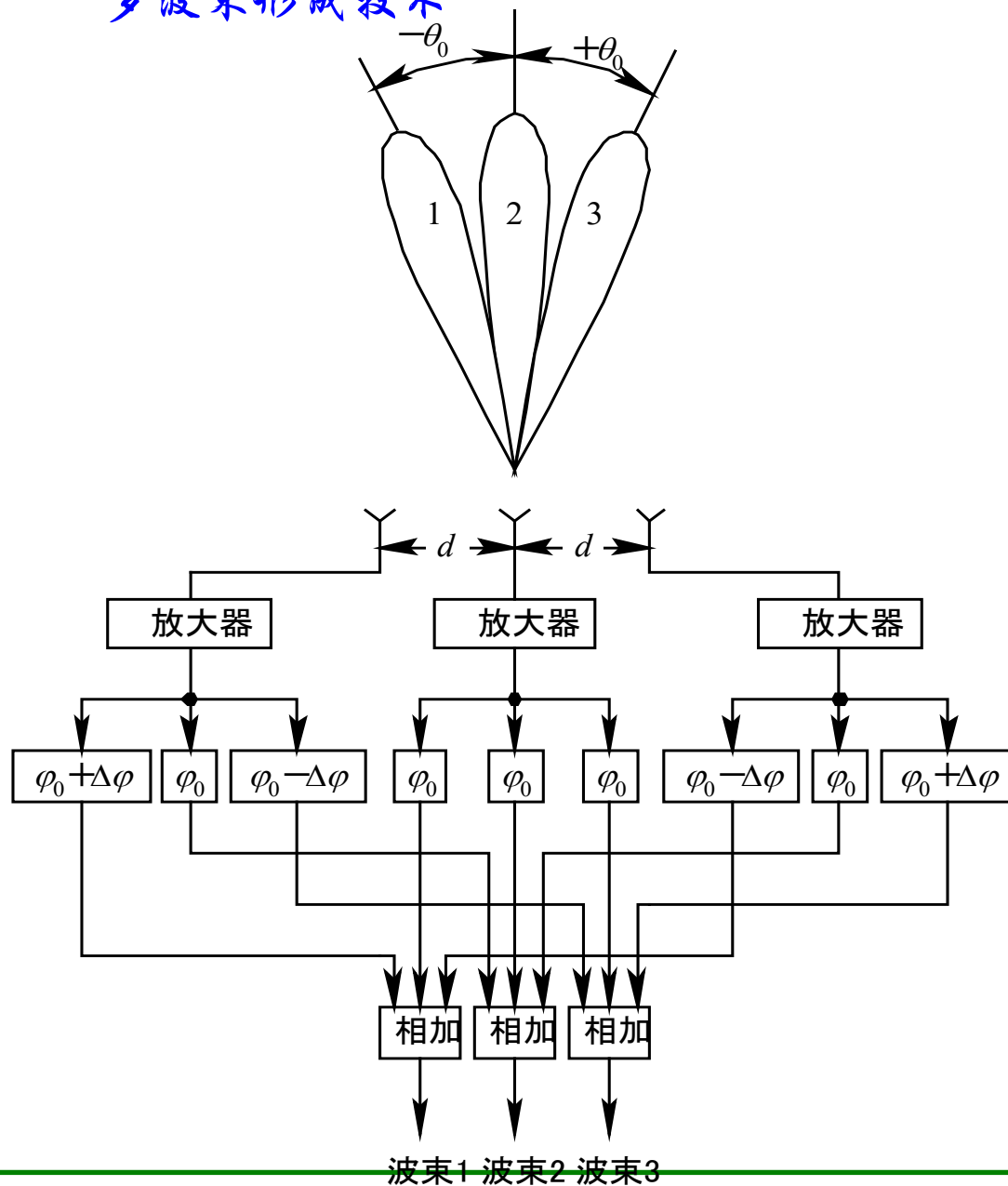
■ 多波束形成技术（续）



中频延迟多波束形成系统

多波束形成技术

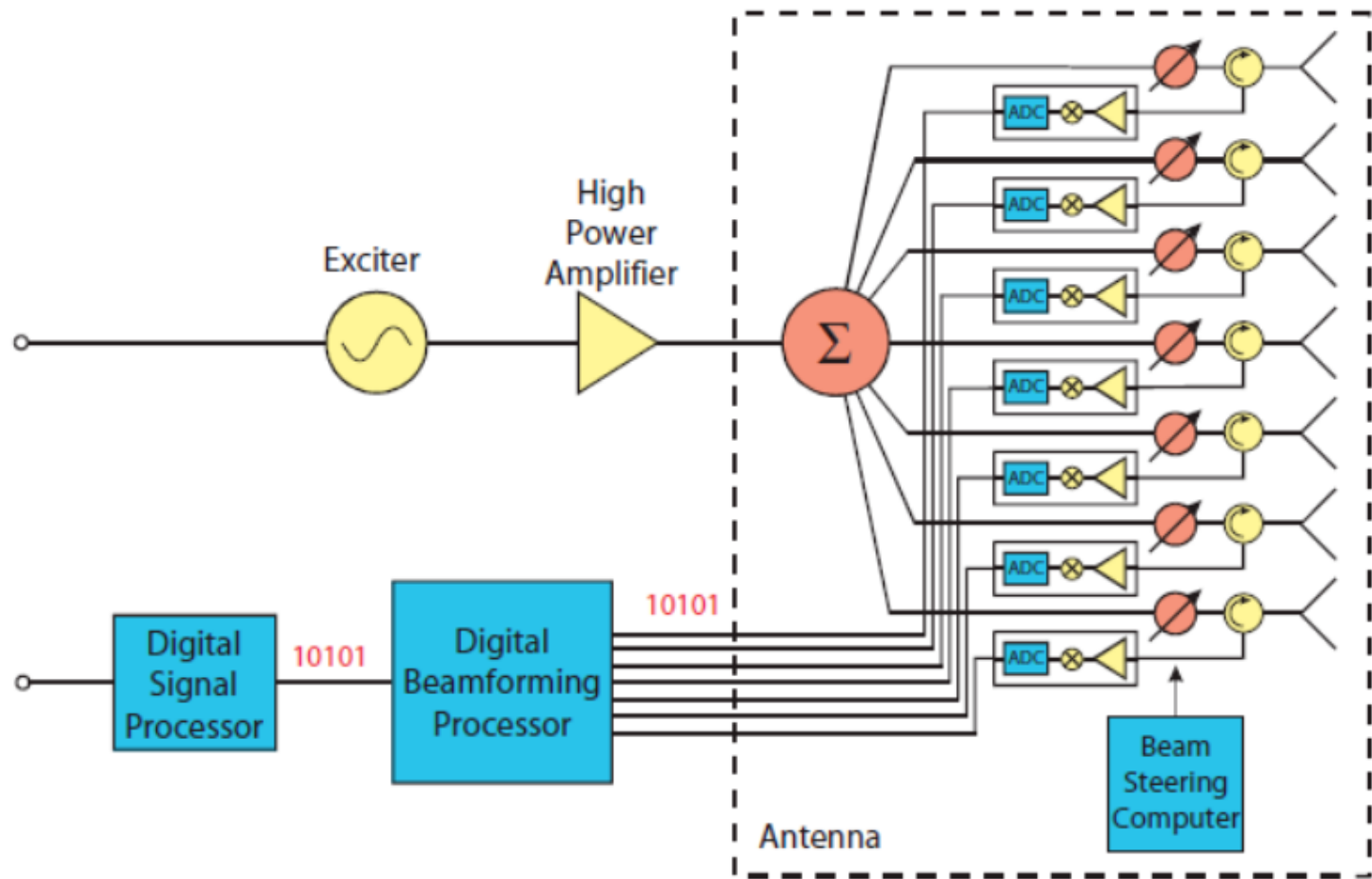
■ 多波束形成技术（续）



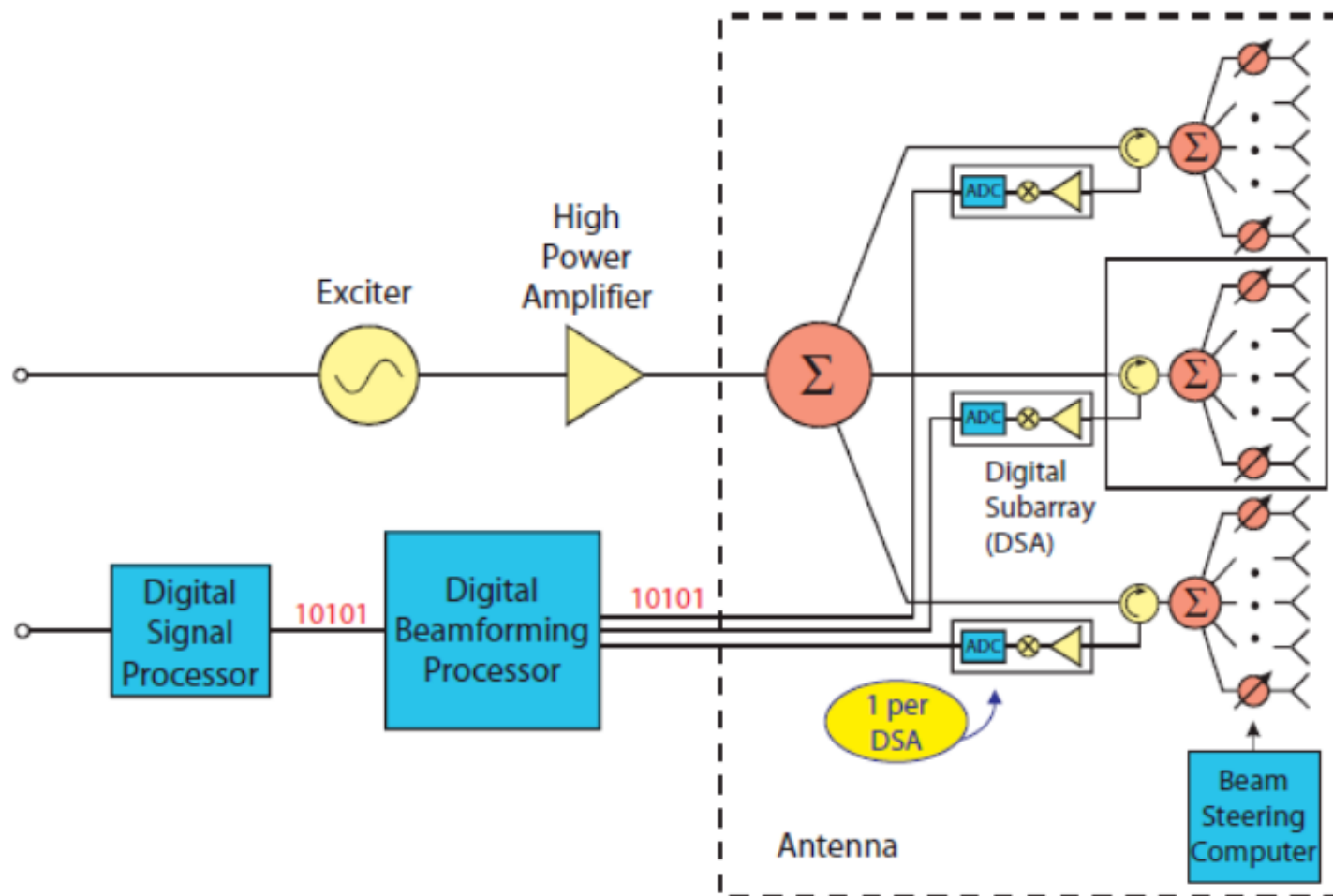
移相法实
现多波束

波束1 波束2 波束3

发展趋势——数字波束形成



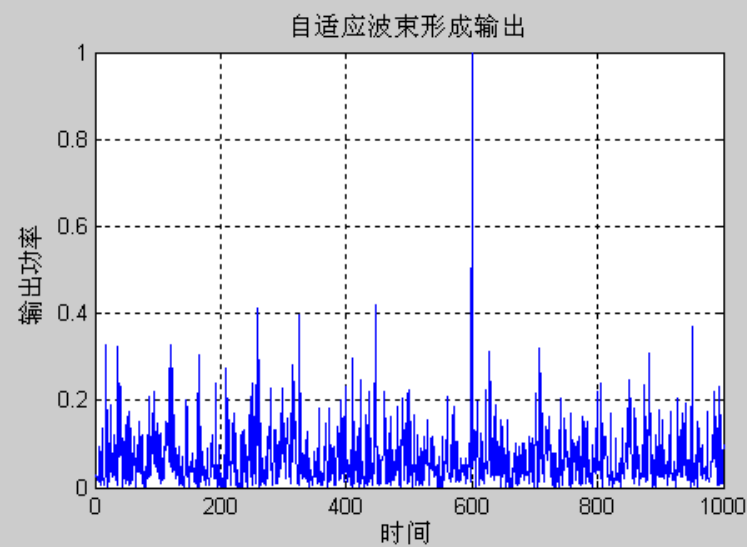
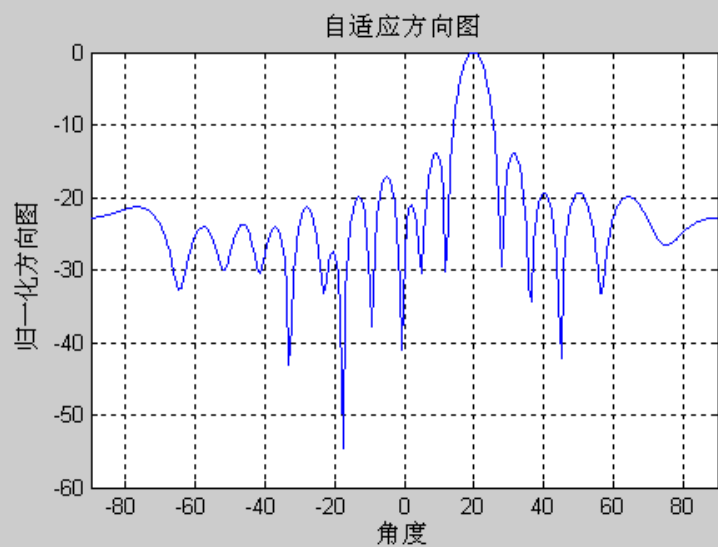
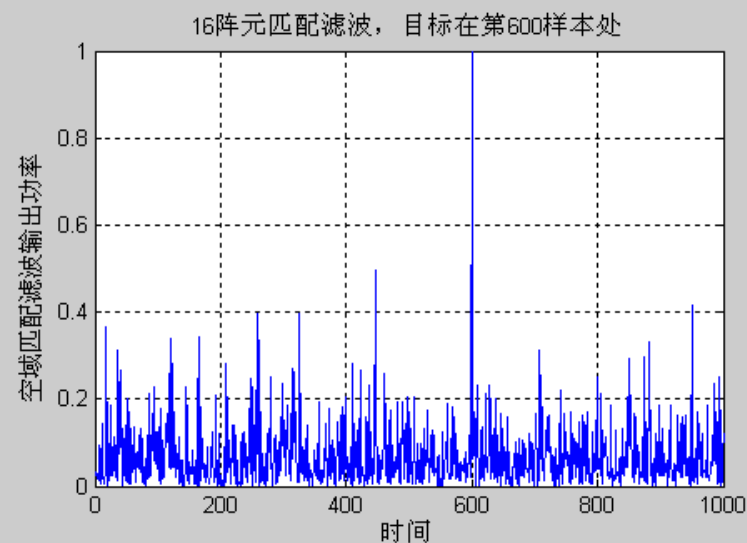
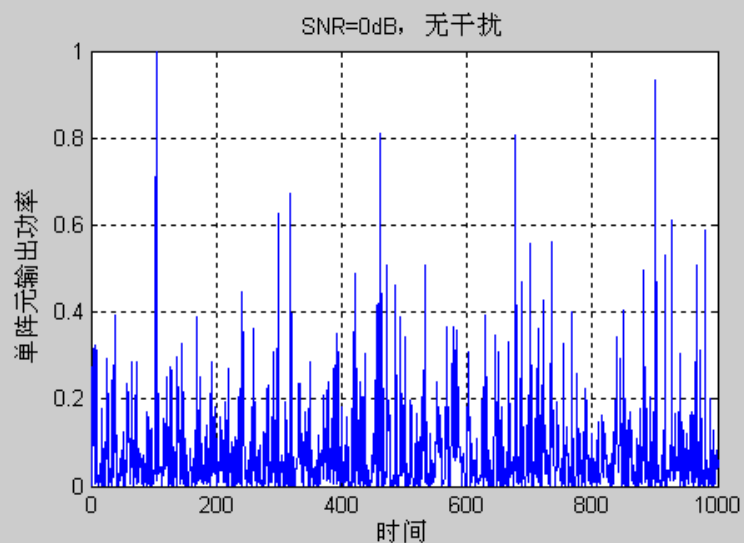
数字波束形成折中方案



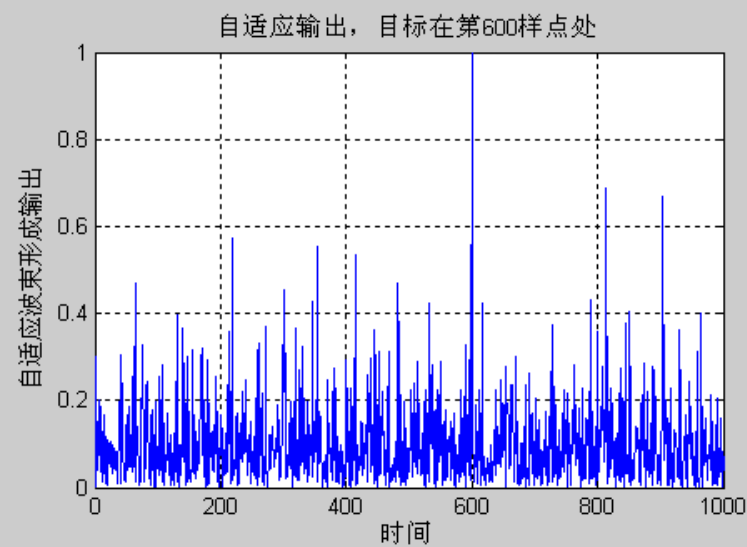
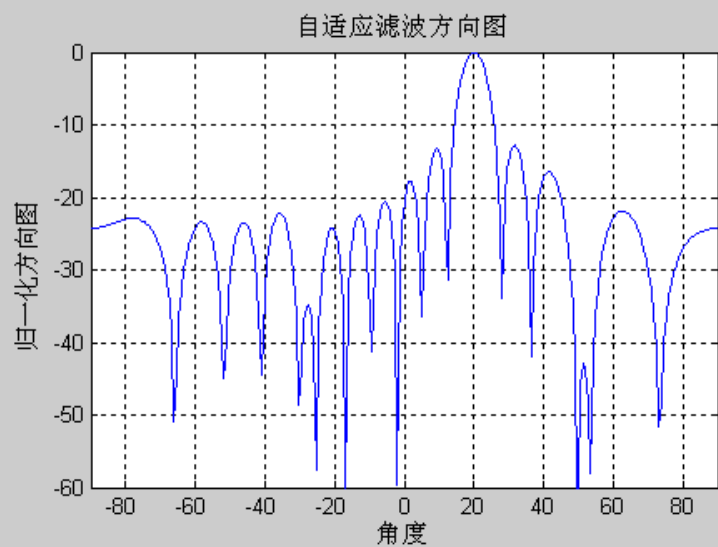
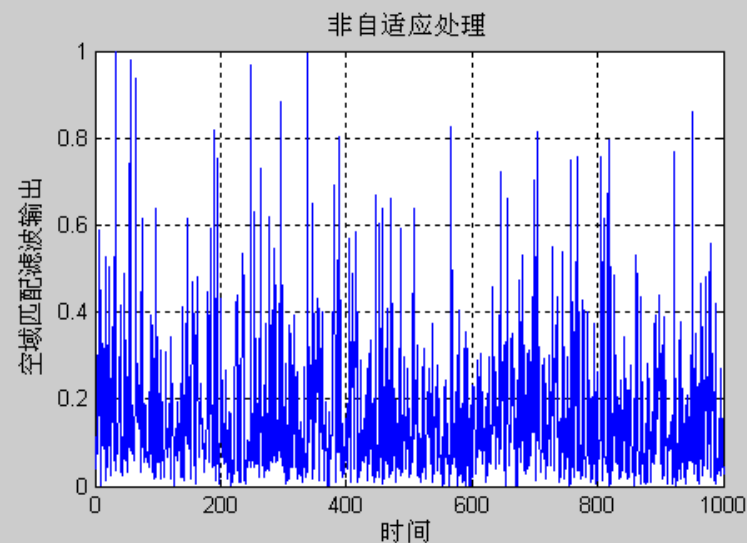
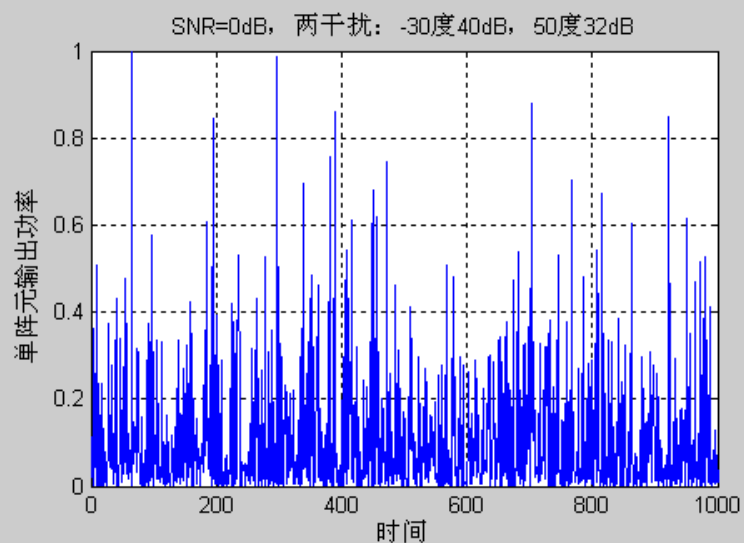
数字波束形成优点和挑战

- 
- 多波束
 - 稳健性、灵活性
 - 干扰抑制等操作
 - 给集成带来更大挑战

空域滤波及数字波束形成引论



空域滤波及数字波束形成引论



- 空域滤波及数字波束形成引论（续）
 - 自适应干扰对消
 - 阵列信号模型
 - 阵列协相关矩阵：酉对称、正定
 - 特征值与特征矢量及其物理含义
 - 最小二乘法：输出最小，纯噪声输出，MSE
 - 干扰对消权矢量：最小特征矢量

- 空域滤波及数字波束形成引论（续）
 - 自适应波束形成
 - 信号模型
 - 最优准则：信号方向增益恒定条件下输出MSE最小，
 - 最优解：最大似然解、最大输出SNR
 - Capon法（LCMV）的特征空间解释
 - 自适应最优波束形成权矢量
 - 广义旁瓣对消（GSC）：主通道与辅助通道

空域滤波及数字波束形成引论

- 空域滤波及数字波束形成引论（续）
 - 自适应波束形成实现：SMI
 - 阵列数据协相关矩阵估计
 - 快拍统计性质与快拍数要求
 - 主瓣偏移与信号失配
 - 副瓣电平提高及对角加权方法
 - 实际考虑：计算量、各种快速求逆算法

7.4 三座标雷达

一. 数据率

1. 定义：单位时间内雷达对指定探测空域内的任一目标所能提供数据的次数，也等于雷达对指定空域探测一次所需的时间（扫描周期 T_s ）的倒数

若，待测空域立体角为 v ，波束宽度立体角为 θ ，重复周期为 T_r ，雷达检测时所必须的回波脉冲积累数为 N ，则扫描周期 T_s 和数据率 D 分别为：

$$T_s = \frac{v}{\theta} NT_r = \frac{v}{\theta} \frac{N}{f_r} \quad \frac{v}{\theta} \text{ 是空域中波束个数, } T_r \text{ 即为每一波束所留时间}$$

$$D = \frac{1}{T_s} = \frac{\theta}{v} \frac{1}{NT_r} = \frac{\theta}{v} \frac{1}{NT} = \frac{\theta f_r}{Nv}$$

二. 立体角：球面上的某一块儿面积除以半径的平方定义为这块儿面积对球所张的立体角

1. 若探测空域为 $\alpha_1 \sim \alpha_2$, $\beta_1 \sim \beta_2$

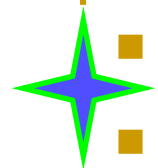
$$\text{则 } v = (\alpha_2 - \alpha_1)(\sin \beta_2 - \sin \beta_1)$$

若 $\alpha_1=0$, $\alpha_2 = 360^\circ$, $\beta_1 = -90^\circ$, $\beta_2 = 90^\circ$, 则 $v = 4\pi$

2. 波束

$$\theta_\alpha, \theta_\beta, \text{则 } \theta = \frac{\theta_\alpha \theta_\beta}{2}$$

$D \uparrow$: $\theta \uparrow$ (精度下降); $f_r \uparrow$ (R_{\max} 减小); $N \downarrow$ (积累数目减少, 多普勒分辨差)



- **多波束定义**
- 在一个（或两个）平面内同时存在数个相互部分重叠的波束。
- 多波束天线有透镜式、反射面式和相控阵式等三种基本形式。此外还有以相控阵作为反射面或透镜馈源的混合形式。
- **多波束透镜天线**
- 利用透镜把馈源所辐射的能量汇聚起来形成一个锐波束，当透镜焦点附近设置多个馈源时，便相应形成指向不同的多个元波束
- 控制各馈源的激励振幅和相位，能使这些元波束合成为具有特定形状的成形波束。



■ 多波束反射面天线

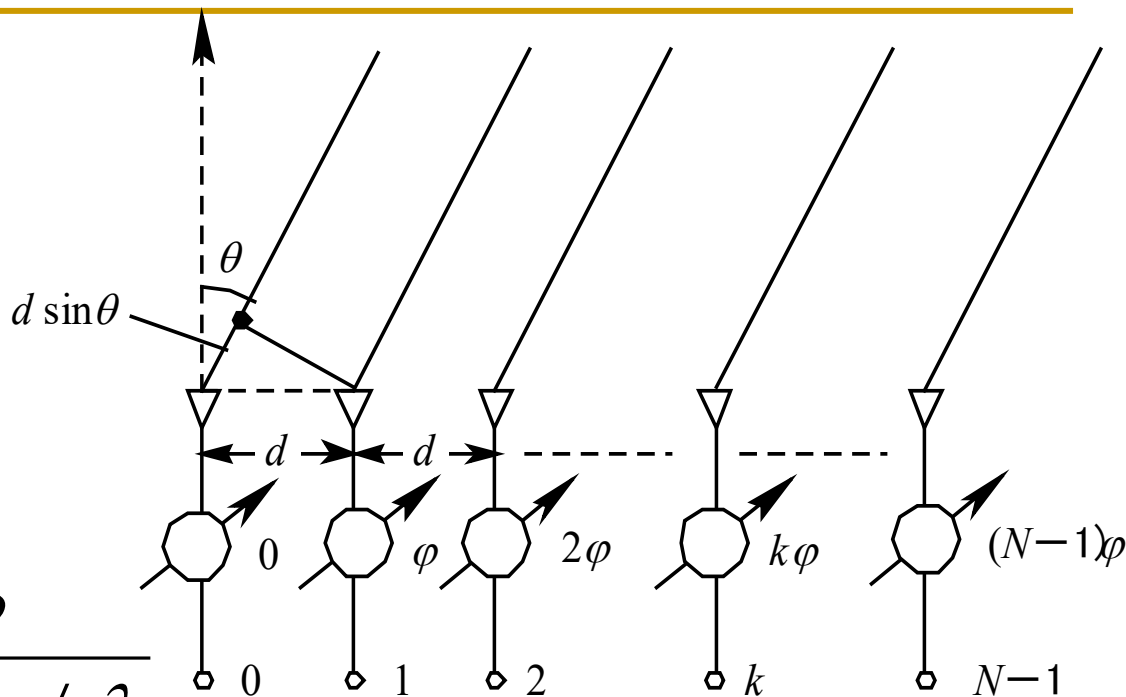
它在反射面焦点附近有多个馈源来形成多波束。为避免馈源系统对反射面口径的遮挡，通常采用偏置单（双）反射面形式。这类天线与多波束透镜天线工作情形相似，但较为轻便简单，是较常用的多波束天线形式。

■ 多波束相控阵天线

- 由许多辐射元排阵构成，用波束形成网络向阵列单元激励所需的振幅和相位，以形成不同形状的成形波束。
 - 多波束天线具有以下几个特点：
 - ①元波束窄而且增益高，若用多个发射机同时向各波束馈电，可获得较远的作用距离；
 - ②合成波束能覆盖特定形状的空域；
 - ③能以组合馈源方式实现低旁瓣。
-

- 假定所有阵元
无方向性
等幅同相馈电
相邻阵元激励电
流相位差为 φ

$$\theta_0 = \sin^{-1} \frac{\varphi}{d \cdot 2\pi / \lambda}$$



N 元直线相控阵天线

- 计算机仿真计算不同加权系数 (θ_0 有关) 和天线间距 d 以及天线个数等参数条件下阵列天线方向图，总结栅瓣、主瓣、增益等与设置参数的关系