

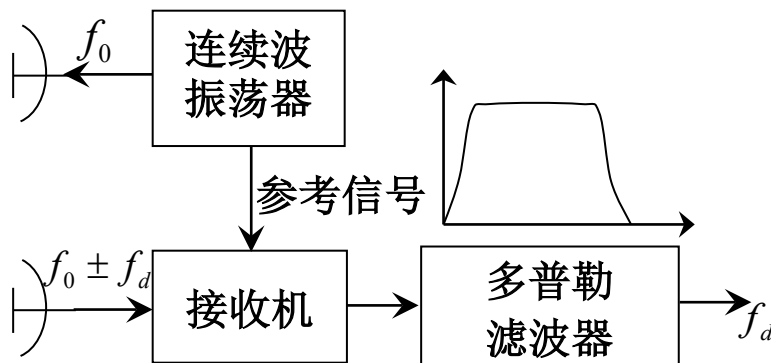
目标多普勒频率的用途

当目标与雷达存在相对径向运动时，目标回波存在多普勒频移，其主要用途有：

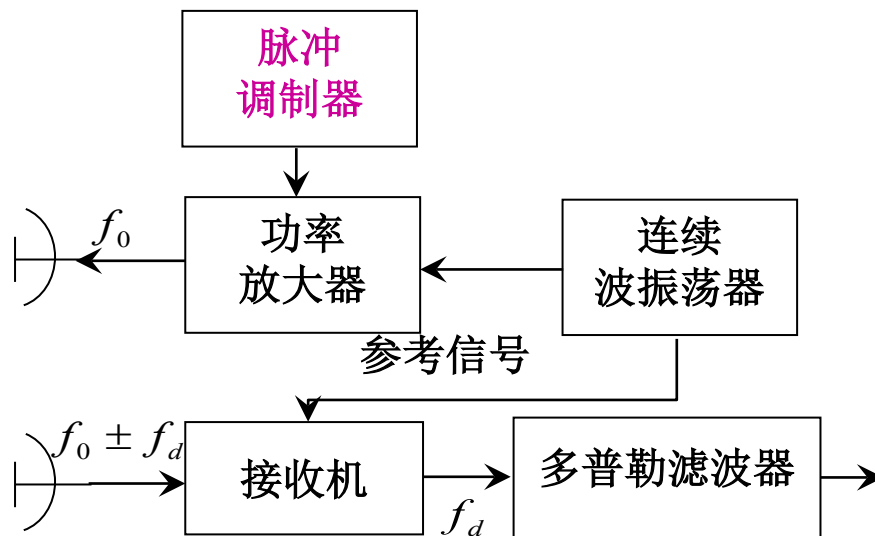
- 可用来实现杂波中**动目标检测及测速**，如脉冲雷达中的**MTI**、**MTD**、**PD**、连续波雷达等进行频域滤波。
- 可用来实现目标成像，如**SAR**、**ISAR**等利用雷达与目标的相对运动获得等效的大空域孔径实现横向(方位)高分辨力。
- 气象雷达用来测量风的切变。

课程主要讨论脉冲雷达如何利用多普勒频率来实现固定杂波中动目标的检测，为此需要了解脉冲雷达的多普勒效应及其特殊性。

脉冲雷达、连续波雷达的区别



(a) 简单连续波雷达



(b) 简单脉冲雷达

简单连续波、脉冲雷达方框图

脉冲雷达的目标回波是对应连续波雷达回波信号的**脉冲取样**，取样后的波形及频谱均将发生变化，从而产生一些特殊的问题。

MTI、MTD、PD

共同点:

- 1、脉冲工作方式
- 2、利用杂波与目标多普勒频率的差异

利用多普勒效应从与目标竞争的、多余的回波即所谓杂波中分离出小的运动目标，杂波是指从地面、海、雨和其它流体、箔条、鸟类、昆虫以及极光反射得到的典型回波。

MOVING-TARGET INDICATION (MTI). MTI is the process of rejecting fixed or slowly moving clutter while passing echoes from targets moving at significant velocities.

MOVING-TARGET DETECTOR (MTD). The MTD is an enhanced configuration of moving-target indicator (MTI) that combines a series of features to improve clutter rejection and target detection. The main features in an MTD are (a) the MTI precanceler, (b) the doppler filter bank, (c) use of burst-to-burst PRF diversity, (d) adaptive thresholding, and (e) the clutter map

A pulsed doppler radar is “a doppler radar that uses pulsed transmissions.” It is understood that pulsed echo signals are processed to provide **coherent integration** and selection of targets having doppler frequencies within specific bands. In the search or target acquisition mode, such radars may use a bank of narrow doppler filters (implemented, for example, with an **FFT processor**) to cover a wide band of possible target dopplers. In pulsed doppler tracking radars a single filter (or a discriminator filter pair) may suffice, once target acquisition has been accomplished. The pulsed doppler radar is distinguished from an **MTI radar** in that the latter uses a bandstop filter to reject clutter and a bandpass filter to accept moving targets without coherent integration.

区别:

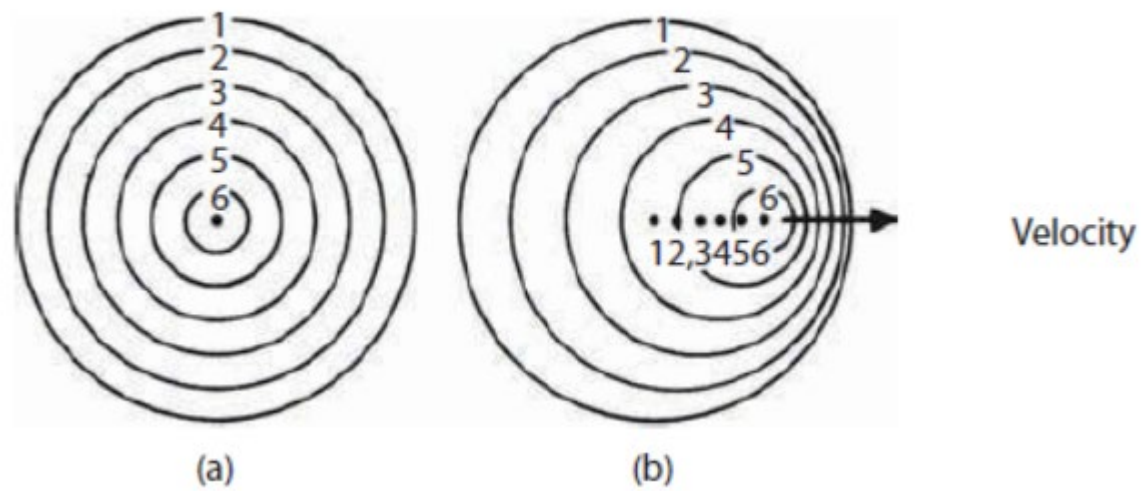
1、信号总体参数差异

MTI、MTD的PRF一般较低，而**PD**具有较高的**PRF**。

2、信号处理方法差异

MTI重点是抑制杂波，而**MTD、PD**抑制杂波的同时对目标进行相参积累(**FFT点数不同**)。

3、MTD特点介于MTI和PD之间。通常MTD被视为低PRF的PD。



多卜勒效应及其在雷达中的应用

多普勒效应（波是时间和空间的函数）

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} = \frac{2}{\lambda} v_r = \frac{2v_r}{c} f_0$$

1. 雷达发射连续波的情况

径向速度：电磁波传播方向上

这时发射信号可表示为 $s(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$

回波信号 $s_r(t)$ 为 $s_r(t) = ks(t - t_r) = kA \cos[\omega_0(t - t_r) + \varphi]$

如果目标固定不动，则距离 R 为常数。 $t_r = 2R/c$

当目标与雷达站之间有相对运动时， $R(t) = R_0 - v_r t$

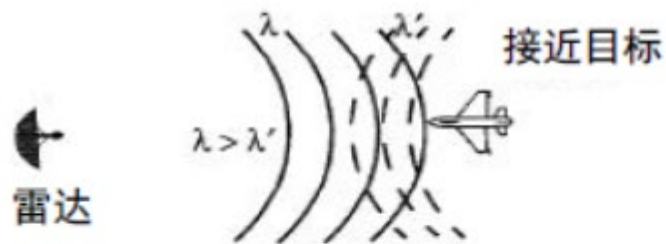
回波信号比起发射信号来，高频相位差

$$\varphi = -\omega_0 t_r = -\omega_0 \frac{2}{c} (R_0 - v_r t) = -2\pi \frac{2}{\lambda} (R_0 - v_r t)$$

若目标运动方向与雷达和目标连线夹角为 α ，目标速度为 v 。则径向速度

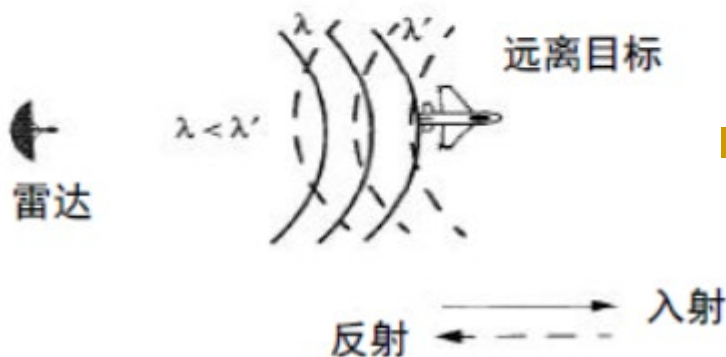
$$v_r = v \cos \alpha$$

■ 波前变化角度理解多普勒效应



■ 波前被压缩

$$f_d > 0$$



■ 波前被扩展

$$f_d < 0$$

$$\varphi = -\omega_0 t_r = -\omega_0 \frac{2}{c}(R_0 - v_r t) = -2\pi \frac{2}{\lambda}(R_0 - v_r t)$$

多普勒效应

回波信号的多普勒频移 f_d 正比于径向速度，而反比于雷达工作波长 λ ，即

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{\partial d}{\partial t} \frac{1}{\lambda} = \frac{2v_r}{\lambda} = \frac{f_0}{c} 2v_r$$

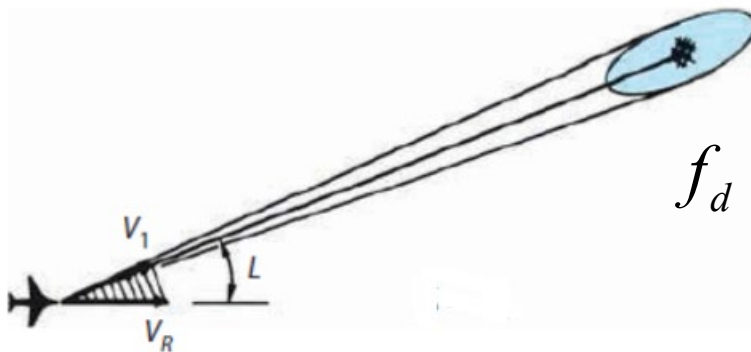
$(d$ 为电磁波传播距离， v_r 定义为使传播距离减小为正，径向速度)

$$\frac{f_d}{f_0} = \frac{2v_r}{c} \quad 2v_r = -\frac{\partial d}{\partial t}$$

多卜勒频率处于**音频范围**（20-20kHz）。

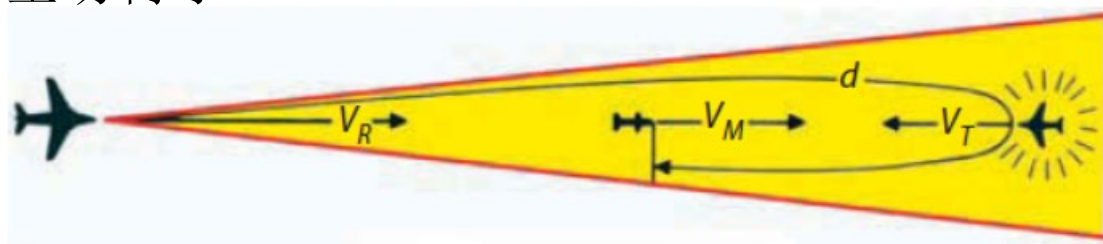
例如当 $\lambda = 10 \text{ cm}$, $v_r = 300 \text{ m/s}$ 时，求得 $f_d = 6\text{kHz}$ 。而此时雷达工作频率 $f_0 = 3000\text{MHz}$ ，目标回波信号频率为 $f_r = 3000 \text{ MHz} \pm 6\text{kHz}$ 。因此要从接收信号中提取多卜勒频率需要采用差拍的方法。

■ 多普勒示例



$$f_d = -\frac{\partial d}{\partial t} \frac{1}{\lambda} = \frac{2v_1}{\lambda} = \frac{2v_R \cos L}{\lambda}$$

导弹半主动制导



$$f_d = -\frac{\partial d}{\partial t} \frac{1}{\lambda} = \frac{v_R + 2v_T + v_M}{\lambda}$$

思考：假设置目标以速度 v 绕雷达做圆周运动，目标雷达回波多普勒频率？

运动目标检测及测速——多普勒效应及其在雷达中的应用

◆ 多普勒信息的提取

1. 连续波多普勒雷达

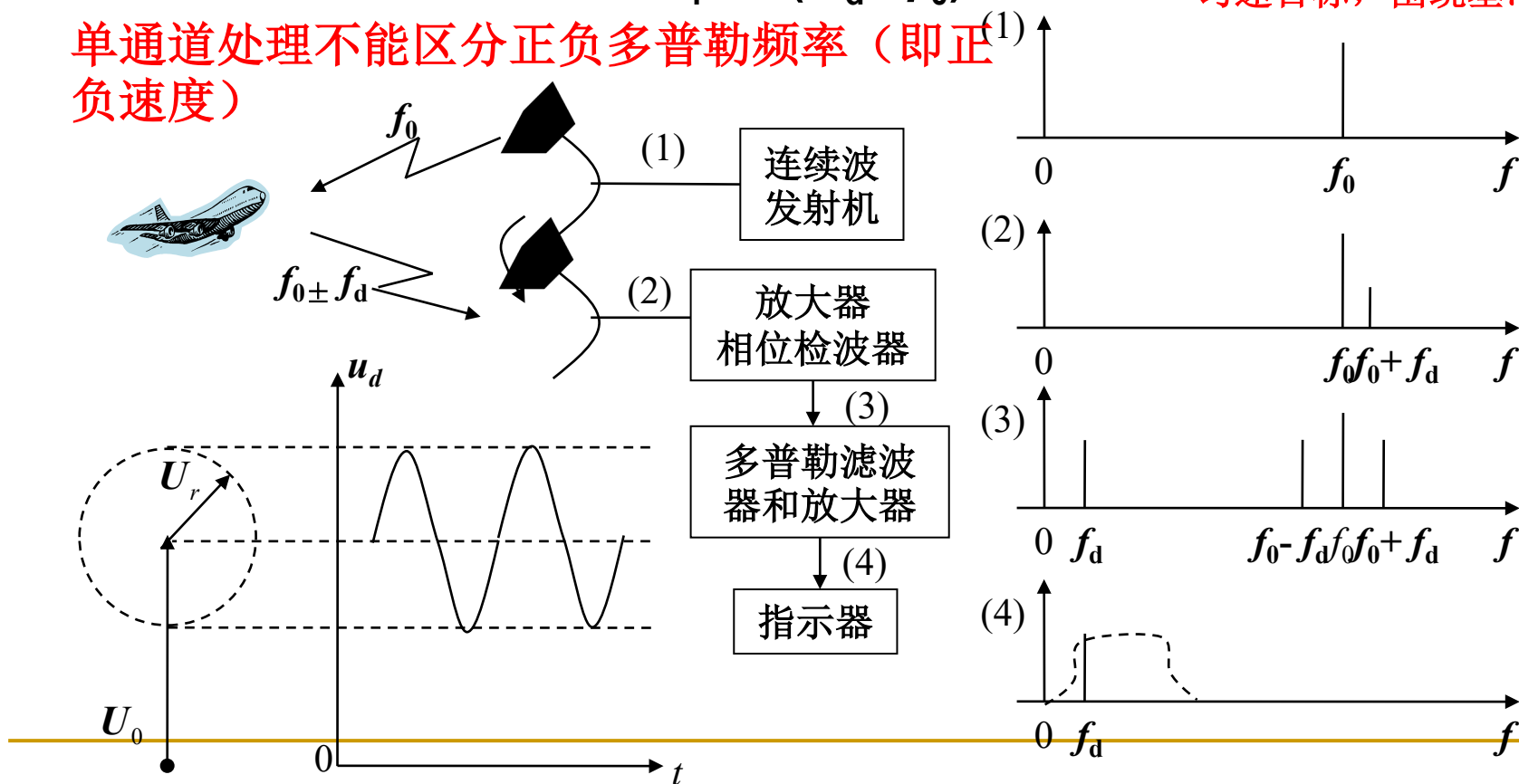
$$\varphi = -w_0 t_r = -w_0 \frac{2R(t)}{c} = -\frac{2\pi}{\lambda} 2(R_0 - v_r t)$$

当 $U_r \ll U_0$ 时, $U_\Sigma \approx U_0 + U_r \cos \varphi = U_0 + U_r \cos(\omega_d t - \varphi_0)$

相位检波输出 (单通道): $U_r \cos(\omega_d t - \varphi_0)$

单通道处理不能区分正负多普勒频率 (即正负速度)

固定目标, 无交流分量
匀速目标, 围绕基准点旋转



◆ 多普勒提取原理（相位检波）

$$\varphi(t) = -\omega_0 t_r = -\omega_0 \frac{2R(t)}{c} = -\frac{2\pi}{\lambda} 2(R_0 - v_r t)$$

$$u_{\Sigma}(t) = U_0 \cos \omega_0 t + U_r \cos(\omega_0 t + \varphi(t))$$

$$= \operatorname{Re}\{(U_0 + U_r e^{j\varphi(t)})e^{j\omega_0 t}\}$$

$$= \operatorname{Re}\{U_{\Sigma} e^{j\theta(t)} e^{j\omega_0 t}\}$$

$$= U_{\Sigma} \cos(\omega_0 t + \theta(t))$$

$$U_{\Sigma} = \|U_0 + U_r e^{j\varphi(t)}\|$$

$$= \|(U_0 + U_r \cos \varphi(t)) + jU_r \sin \varphi(t)\|$$

$$U_r \ll U_0 \rightarrow \approx U_0 + U_r \cos \varphi(t)$$

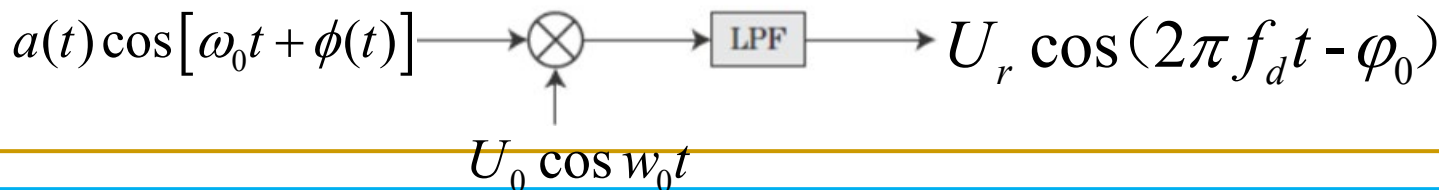
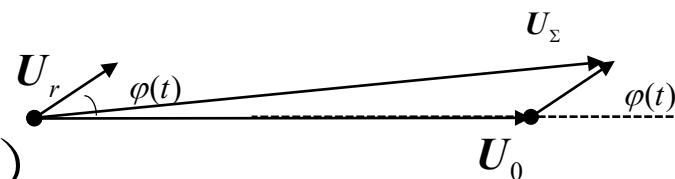
包络检波后输出：

$$U_{\Sigma} = U_0 + U_r \cos \varphi(t)$$

$$\theta(t) = \operatorname{arctg} \frac{U_r \sin \varphi(t)}{U_0 + U_r \cos \varphi(t)} \approx 0$$

去掉直流分量后检波输出：

$$U_r \cos \varphi(t) = U_r \cos(2\pi f_d t - \varphi_0)$$



运动目标检测及测速——多普勒效应及其在雷达中的应用

◆ 多普勒信息的提取

1. 连续波多普勒雷达

$$\varphi = -w_0 t_r = -w_0 \frac{2R(t)}{c} = -\frac{2\pi}{\lambda} 2(R_0 - v_r t)$$

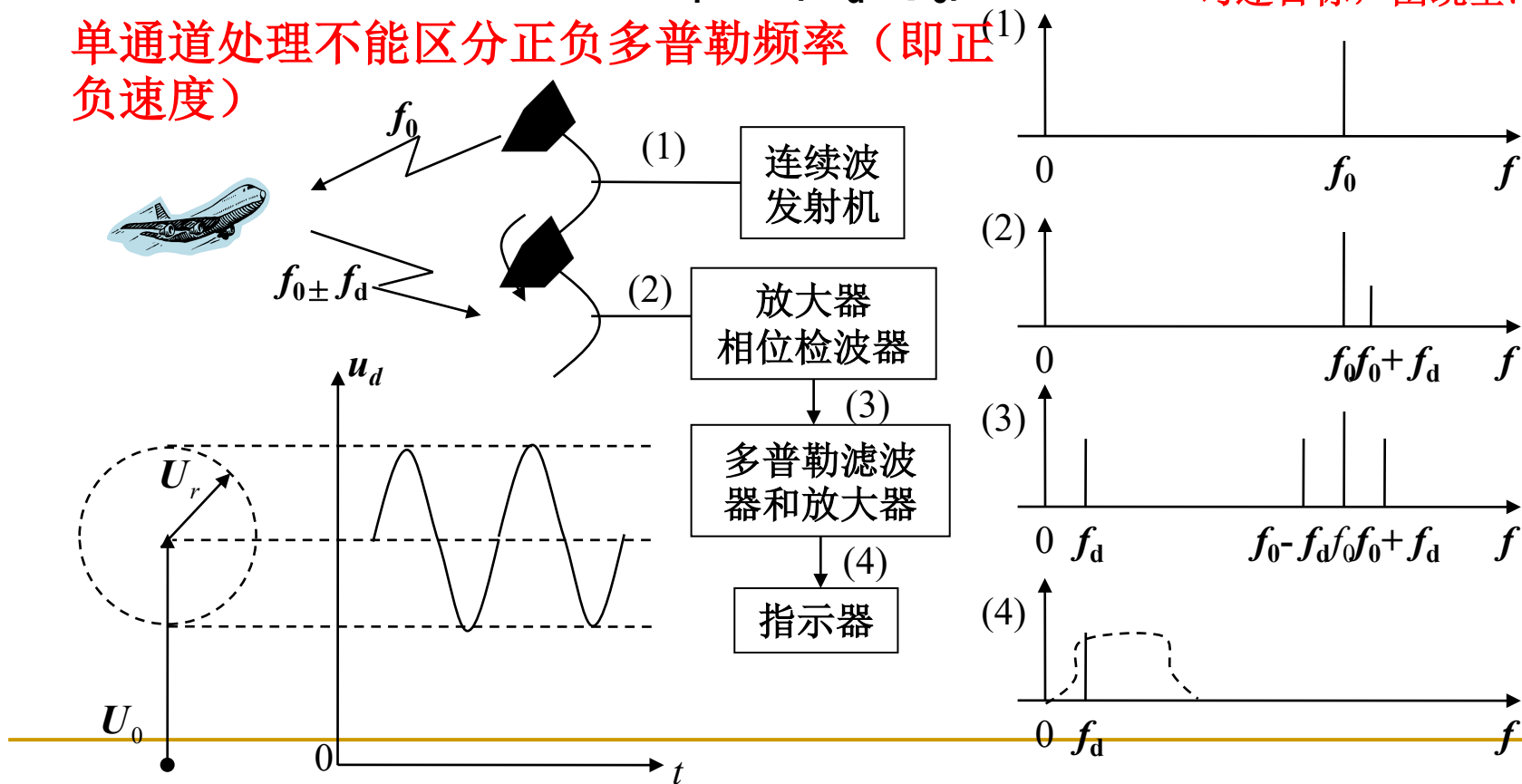
当 $U_r \ll U_0$ 时, $U_\Sigma \approx U_0 + U_r \cos \varphi = U_0 + U_r \cos(\omega_d t - \varphi_0)$

相位检波输出 (单通道): $U_r \cos(\omega_d t - \varphi_0)$

单通道处理不能区分正负多普勒频率 (即正负速度)

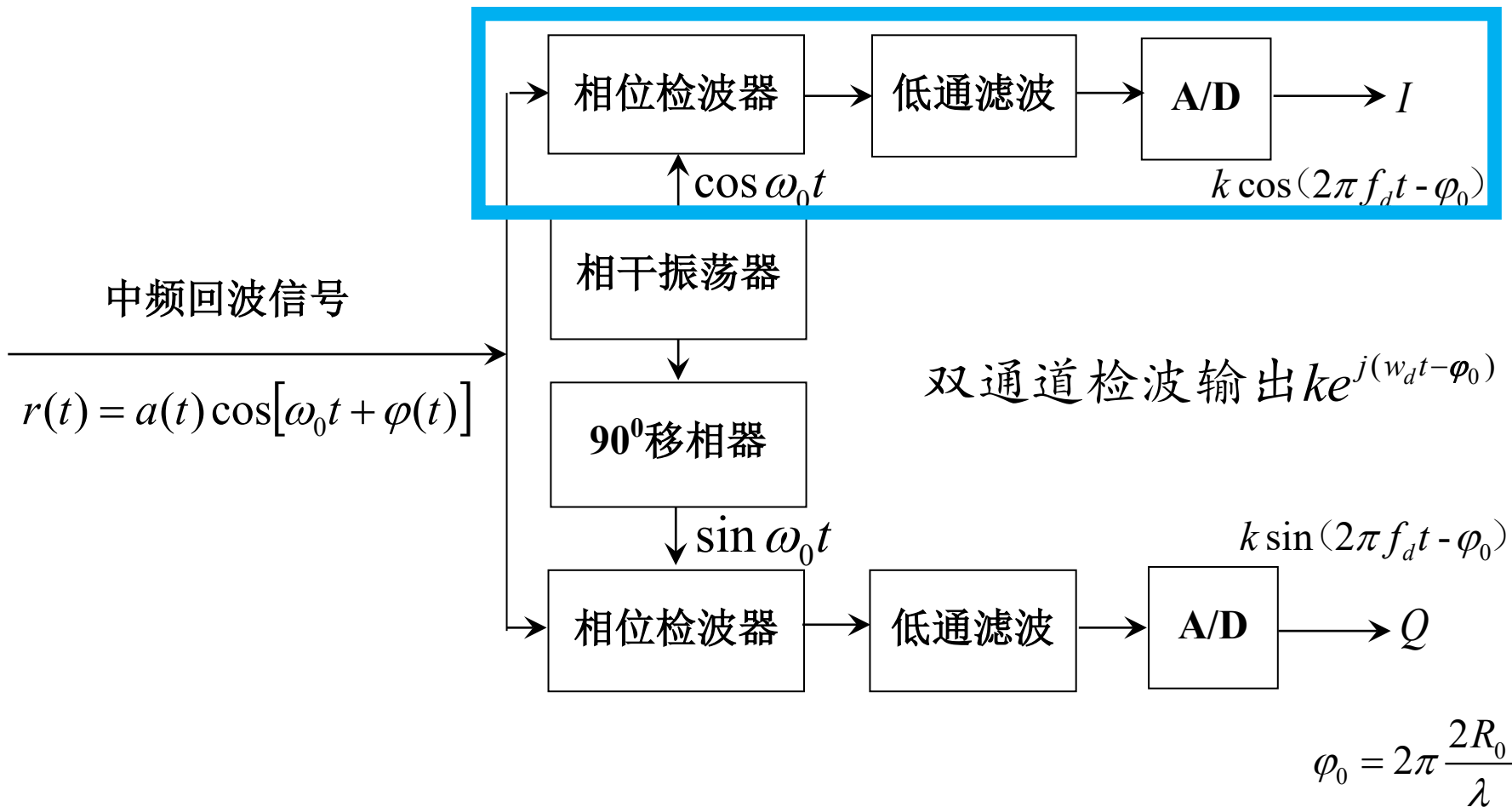
固定目标, 无交流分量

匀速目标, 围绕基准点旋转

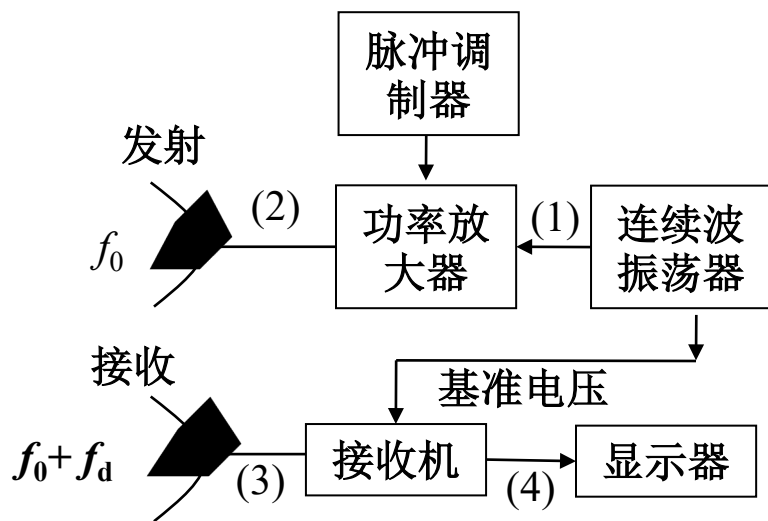


正交双通道处理（区分正负多普勒频率）

通过正交解调获得基带I、Q分量（即回波信号在两个互相正交的方向的投影），能够完整无模糊地表达信号。

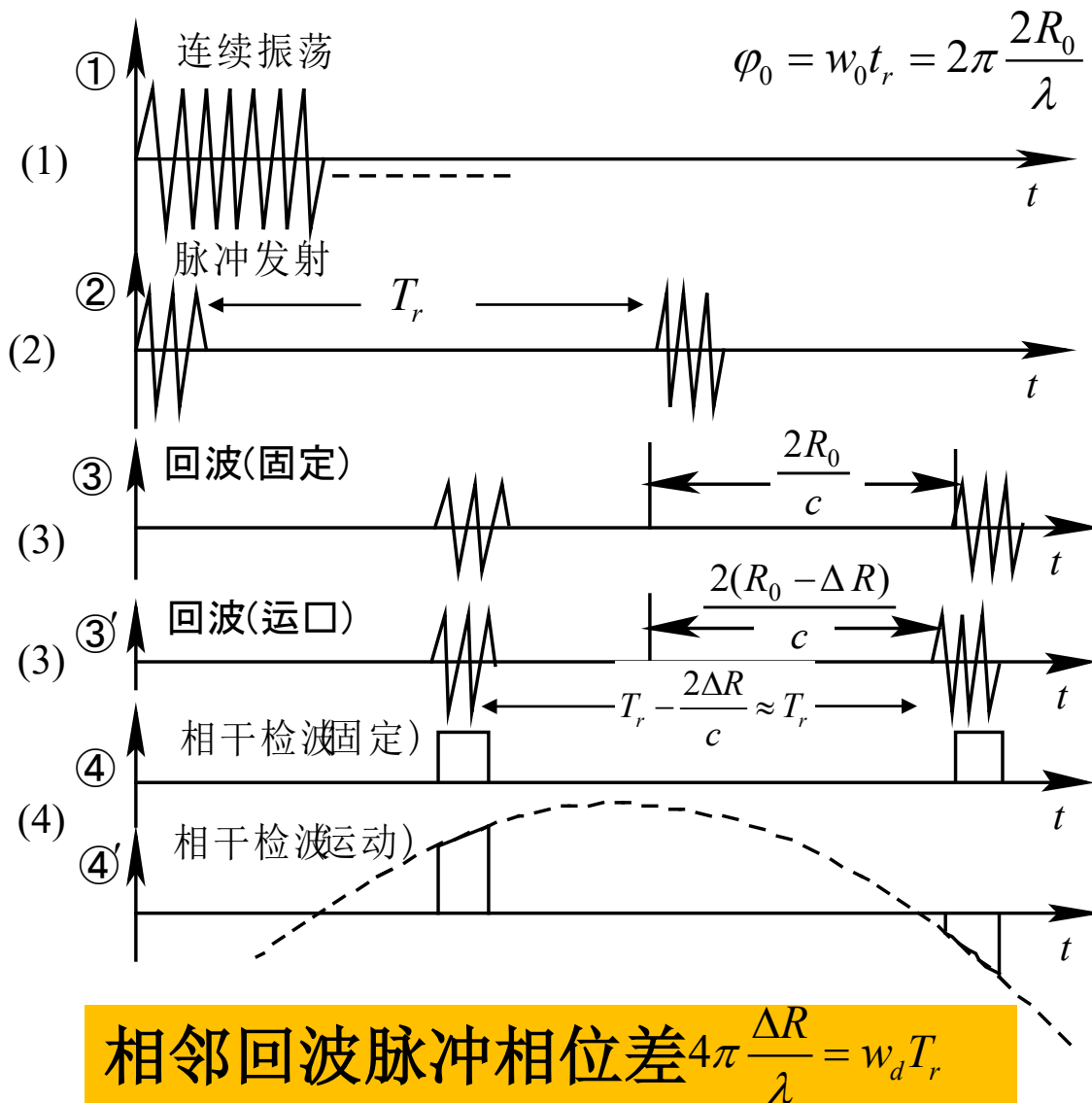


脉冲雷达



脉冲雷达的目标回波近似为对应连续波雷达回波信号的脉冲取样，但取样后的波形及频谱均将发生变化，会产生一些特殊问题

相应连续波检波输出 $k\cos(\omega_d t - \varphi_0)$ 或 $ke^{j(\omega_d t - \varphi_0)}$



脉冲雷达的回波信号形式

固定目标：等幅脉冲串



连续波情况下的目标回波信号：

$$\cos[-\omega_0 t_R] = \cos[-4\pi R(t)/\lambda]$$

1、固定目标

$$\text{相位差 } \varphi = -\omega_0 t_R = -2\omega_0 R_0/c = -\varphi_0$$

$\cos\varphi = \cos\varphi_0$ 可能取包括零在内的从+1到-1的任何固定数值，即脉冲雷达相位检波器的输出为**一等幅脉冲串**。

2、运动目标

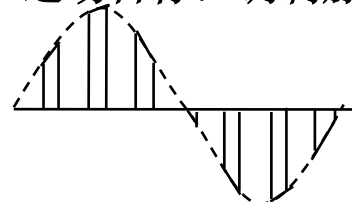
$$\text{相位差 } \varphi = -\omega_0 t_R = -2\omega_0 (R_0 - v_r t)/c$$

$\cos\varphi = \cos(\omega_d t - \varphi_0)$ ，脉冲雷达回波是按脉冲重复周期对此差拍多普勒频率信号进行矩形取样输出，存在两种情形(设脉冲宽度 τ ，脉冲重复周期 T_r ，脉冲重复频率 $f_r = 1/T_r$)：

单通道处理：对函数 $\cos(\omega_d t - \varphi_0)$ 在 $T=0, T_r, 2T_r, \dots$ 时间点的采样

双通道处理：对函数 $\exp(j(\omega_d t - \varphi_0))$ 在 $T=0, T_r, 2T_r, \dots$ 时间点的采样

运动目标：调制脉冲



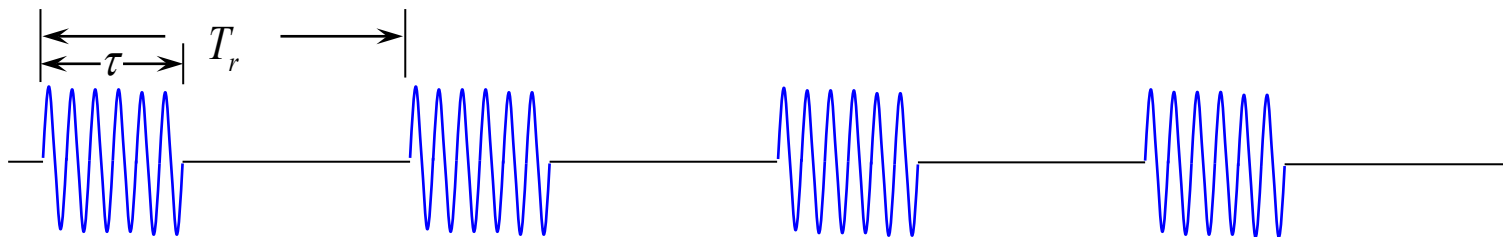
脉冲雷达动目标回波

(1) $|f_d| < 1/\tau$ 时 (常见情形)

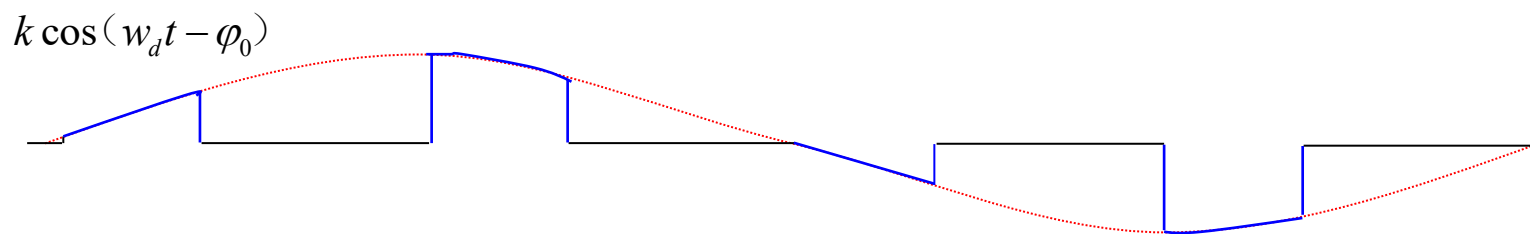
这个多普勒频移只使相位检波器输出脉冲的顶部产生畸变，即回波脉冲的包络调制频率为多普勒频率(当 $-f_r/2 \leq f_d \leq f_r/2$ 时)。这表明此时要检测出多普勒频率需要多个脉冲串信号，下图中虚线相当于连续波雷达工作时动目标回波信号。

(2) $|f_d| > 1/\tau$ 时

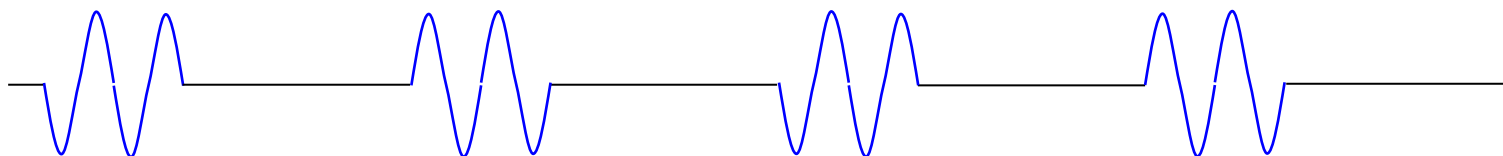
单个回波脉冲宽度内至少会出现一个完整周期的多普勒频率信号，这时可利用单个脉冲所包含的信息测出其多普勒频率，不存在下面的盲速及频闪效应。



高频或中频回波脉冲串



$f_d < 1/\tau$ 时视频脉冲串 ($-f_r/2 \leq f_d \leq f_r/2$)



$f_d > 1/\tau$ 时视频脉冲串

脉冲雷达动目标回波示意图

$|f_d| < 1/\tau$ 时脉冲雷达的特殊现象

脉冲工作状态且 $|f_d| < 1/\tau$ 时，脉冲雷达将产生特殊问题：

盲速、频闪效应

理解： F_d 是实际测定的多普勒频率值

频闪效应(多普勒测速模糊)

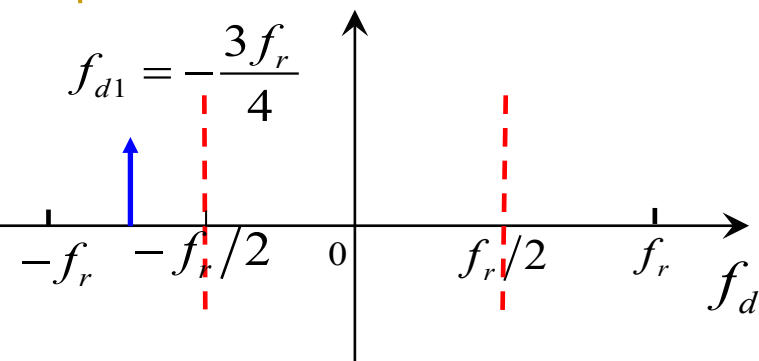
频闪效应是指当脉冲工作状态时，相位检波器输出端回波脉冲串的包络调制频率 F_d 和运动目标的径向速度 v_r 不再保持正比关系，即 $F_d \neq f_d = 2v_r/\lambda$ 。

脉冲雷达相位检波器输出近似为对连续信号 $k\cos(\omega_d t - \varphi_0)$ （单通道）或者 $ke^{j(\omega_d t - \varphi_0)}$ （双通道）以间隔 T_r 采样(即采样率 f_r)，为防止频谱混叠，必须有

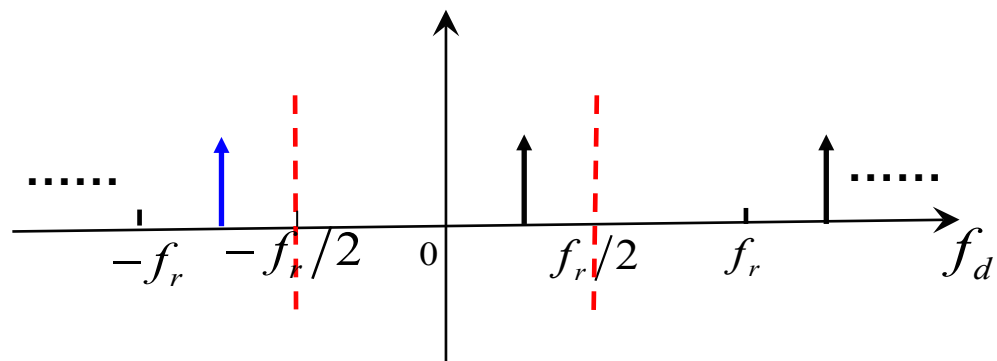
$$|f_d| \leq f_r/2$$

即取样频率 f_r 必须大于两倍信号多普勒频率 f_d ，否则将产生测速模糊，即频闪效应。

信号 $e^{j2\pi f_d t}$ 的频谱

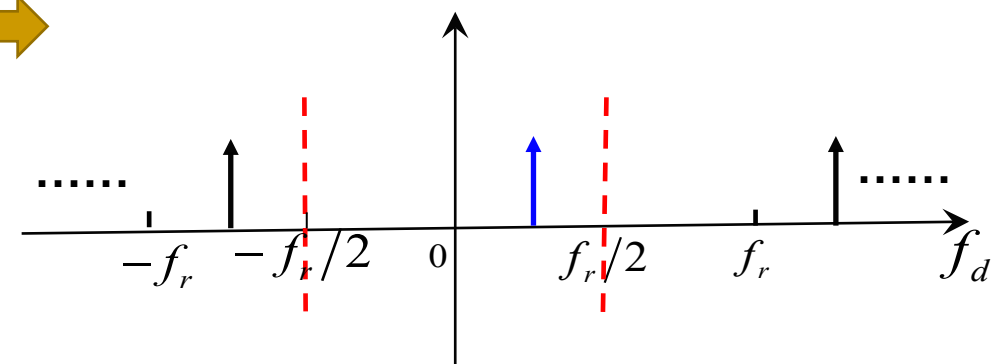
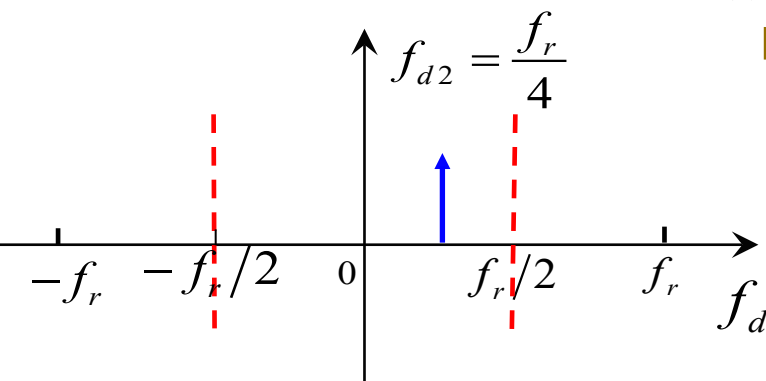


$e^{j2\pi f t}$ 采样后的频谱



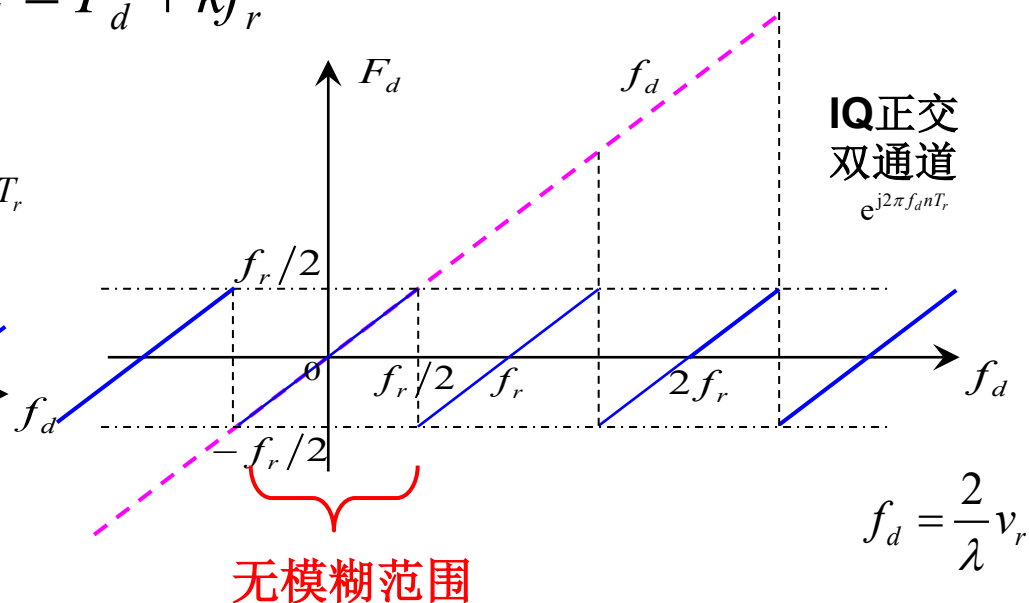
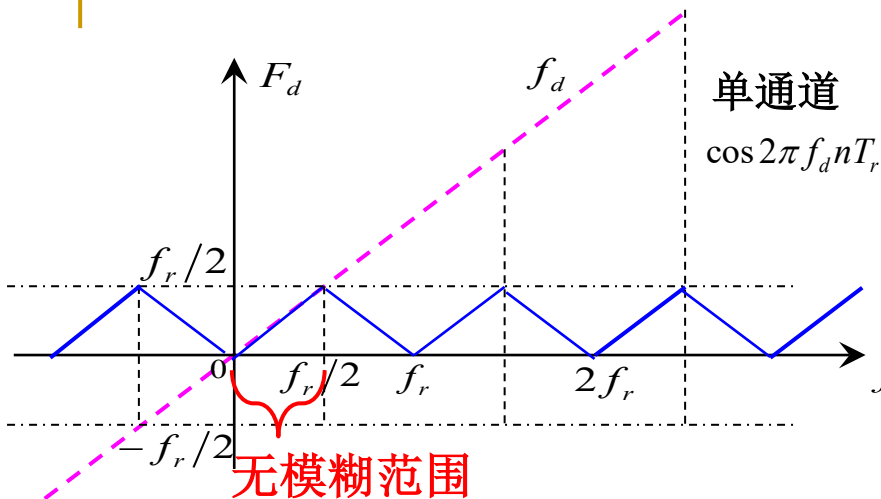
以采样率 f_r 理想采样，
频谱以 f_r 为周期延拓

从频谱上无法区分



多普勒频偏 $|f_d| > \frac{f_r}{2}$ 时，出现多普勒模糊，即无法区分间隔 kf_r 的两个频率

$$f_d = F_d + kf_r$$



$$e^{j2\pi(f_d + kf_r)(nT_r)} = e^{j2\pi f_d(nT_r)}$$

频闪：指速度测量有多值性。 $w_d = 2\pi \frac{2v_r}{\lambda}$ 与 $w_d + k2\pi f_r$ 不能区分。

完全没有多值的测量为 $w_d \in [-\frac{\pi}{T_r}, \frac{\pi}{T_r}]$ $|f_d| < \frac{1}{2} f_r$

盲速：当 $f_d = kf_r = \frac{2v_r}{\lambda}$ $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 时，脉冲不能区别运动目标和固定目标。

从采样上看，相当于所有采样都发生在正弦波的同相位点上，从频谱上看，即回波频谱线与发射频谱线重合。

$|f_d| < 1/\tau$ 时脉冲雷达的特殊现象

盲速(Blind Speed)

盲速就是目标虽有一定的径向速度 v_r ，但其回波信号经过相位检波器后，输出为一串等幅脉冲，与固定目标的回波相同，这时的目标运动速度称为盲速。

注意：盲速是速度的概念，与脉冲重复频率及雷达工作频率/波长有关；而其对应的多普勒频率仅与脉冲重复频率有关。

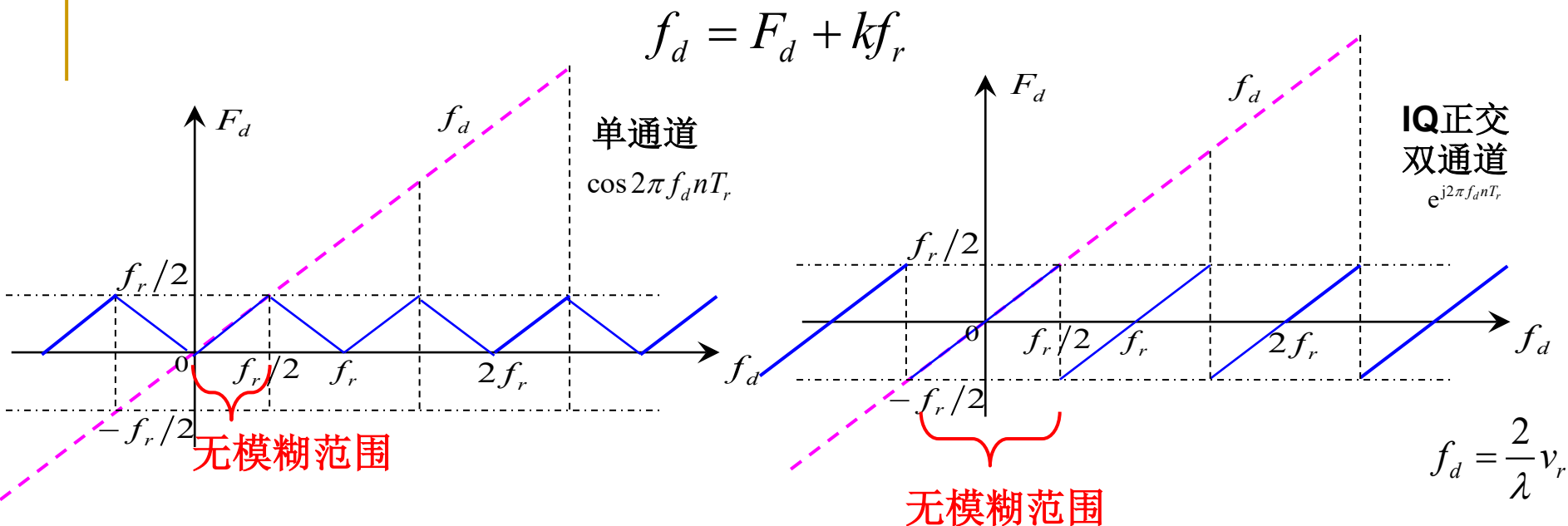
脉冲信号包络： $\cos\varphi = \cos(\omega_d t - \varphi_0)$

相邻重复周期相位差变化量： $\Delta\varphi = \omega_d T_r = 2\pi f_d T_r$

若输出为一等幅脉冲串，则 $\Delta\varphi = 2\pi f_d T_r = 2k\pi$ ，其中 k 为非零整数，即

$$f_d = k f_r \quad \rightarrow \quad v_r = k \lambda f_r / 2 \quad (k = \pm 1, \pm 2, \dots)$$

后面将采用“延时线对消器”的滤波特性解释盲速并提出解决方法。



$$e^{j2\pi(f_d + kf_r)(nT_r)} = e^{j2\pi f_d(nT_r)}$$

频闪：指速度测量有多值性。 $w_d = 2\pi \frac{2v_r}{\lambda}$ 与 $w_d + k2\pi f_r$ 不能区分。

完全没有多值的测量为 $w_d \in [-\frac{\pi}{T_r}, \frac{\pi}{T_r}]$ $|f_d| < \frac{1}{2} f_r$

盲速：当 $f_d = kf_r = \frac{2v_r}{\lambda}$ $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 时，脉冲不能区别运动目标和固定目标。

从采样上看，相当于所有采样都发生在正弦波的同相位点上，从频谱上看，即回波频谱线与发射频谱线重合。

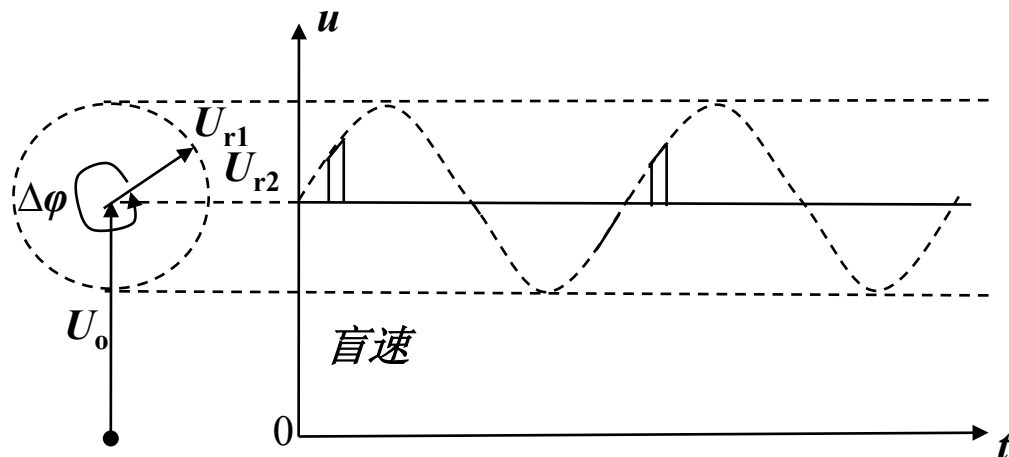
盲速和闪频总结

$f_d < \frac{1}{2}f_r$ 避免因采样造成多普勒频谱混叠

$$f_d = mf_r$$

$$m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

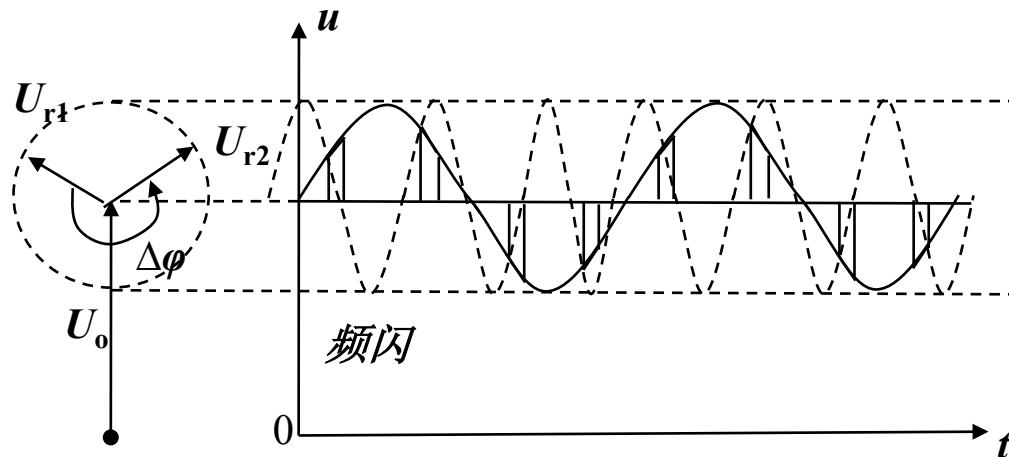
盲速：当动目标的径向速度为上述值时，其回波经相位检波器后为等幅脉冲串，与固定目标相同



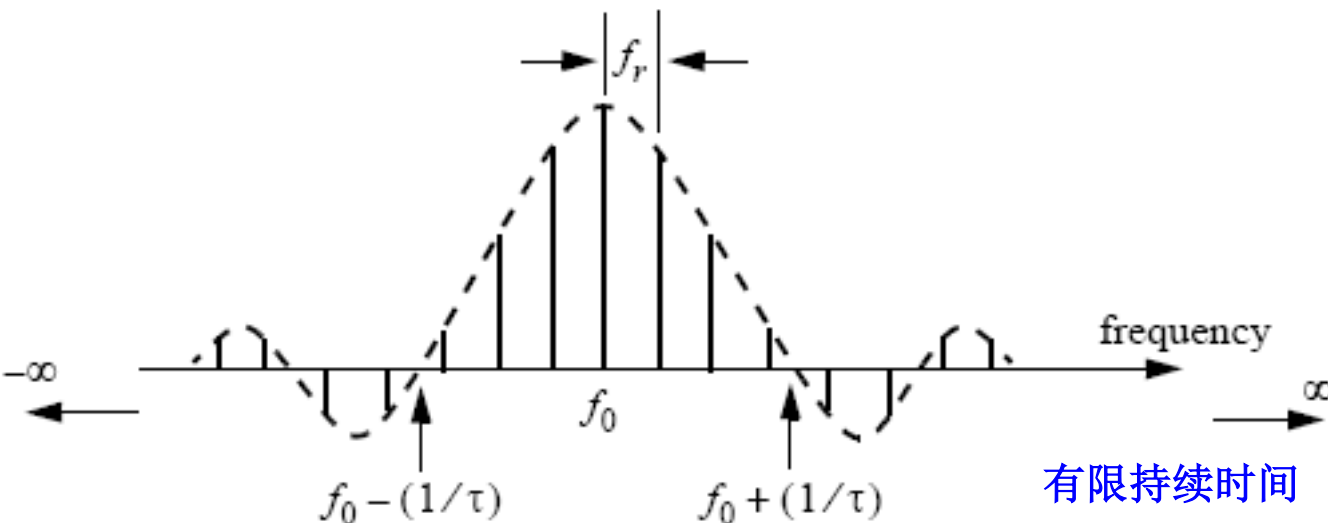
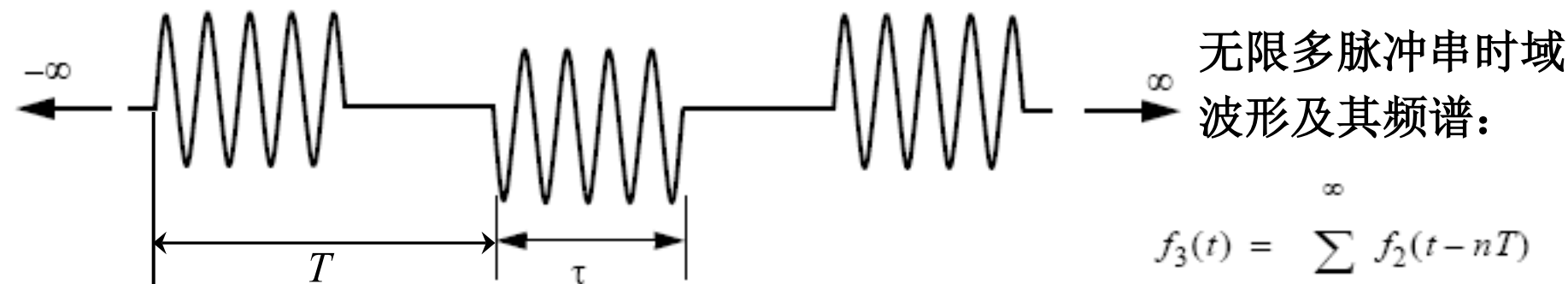
出现频闪条件：

$$f_d \geq 0.5f_r$$

相位检波器输出的脉冲串的包络的频率与目标径向速度的多普勒频率存在差异。利用该多普勒频率进行目标速度测量将产生速度模糊。



无限长单载频相参脉冲串波形及其频谱



$$f_3(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_2(t-nT)$$

$$F_3(\omega) = 2\pi \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n \delta(\omega - 2n\pi f_r)$$

其中 $F_n = \frac{A\tau}{T} \text{Sinc}\left(\frac{n\tau\pi}{T}\right)$

有限持续时间
正弦信号频谱

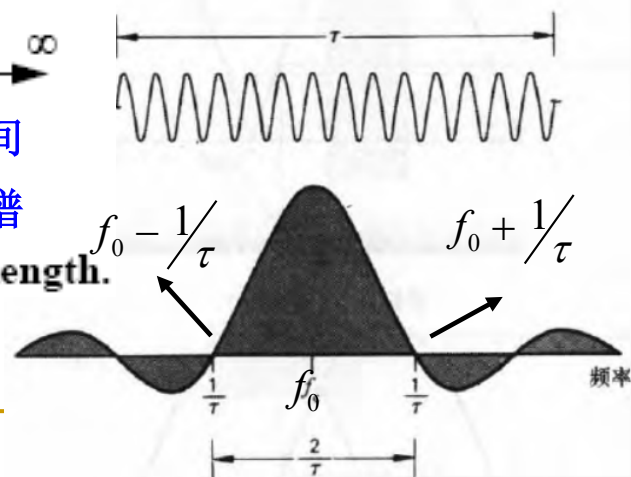
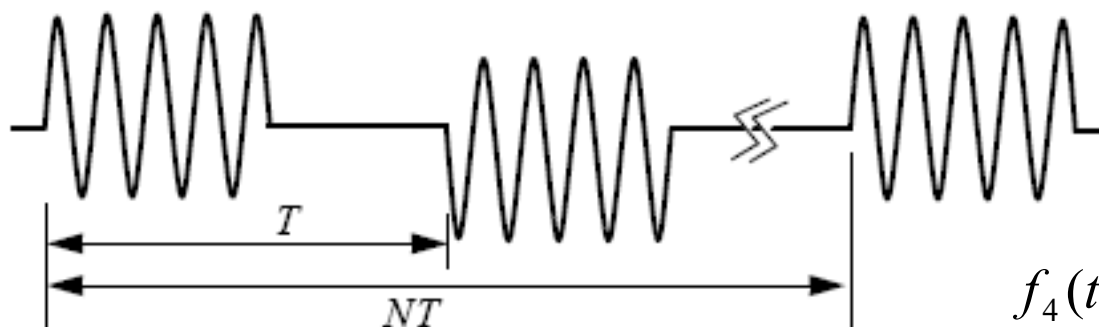


Figure 3.4. Amplitude spectrum for a coherent pulse train of infinite length.

$f_1(t) \cdot f_3(t)$ 的时域、频谱图

有限长单载频相参脉冲串波形及其频谱



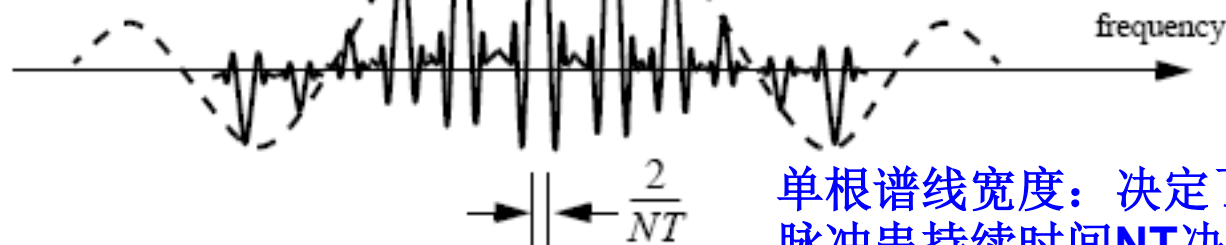
$$f_4(t) = \sum_{n=0}^N f_2(t - nT)$$

$$f_4(t) = \text{Rect}\left(\frac{t}{NT}\right) \cdot f_3(t)$$

谱线间隔 f_r : 决定了最大不模糊多普勒频率

$$F_4(\omega) = AN\tau \left(\text{Sinc}\left(\omega \frac{NT}{2}\right) \bullet \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{Sinc}(n\pi\tau f_r) \delta(\omega - 2n\pi f_r) \right)$$

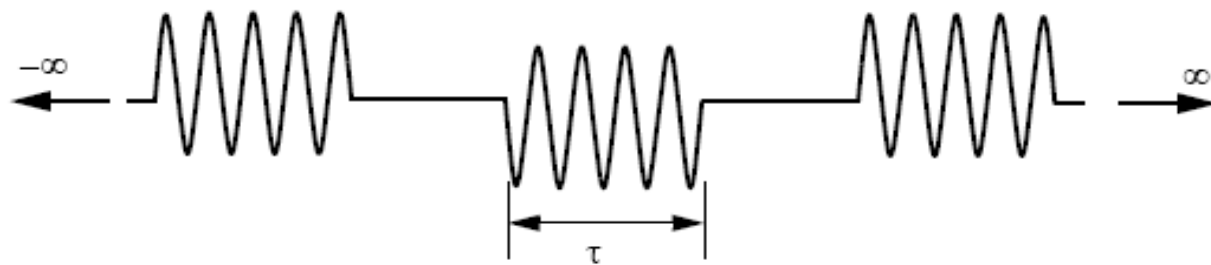
where the operator (\bullet) indicates convolution.



单根谱线宽度: 决定了多普勒频率分辨率 (由脉冲串持续时间 NT 决定)

Figure 3.5. Amplitude spectrum for a coherent pulse train of finite length.

$f_1(t) \cdot f_4(t)$ 的时域、频谱图



正交双通道处理的相参雷达回波谱(一个周期内)范围:

$$f_d \sim [-f_r/2, f_r/2]$$

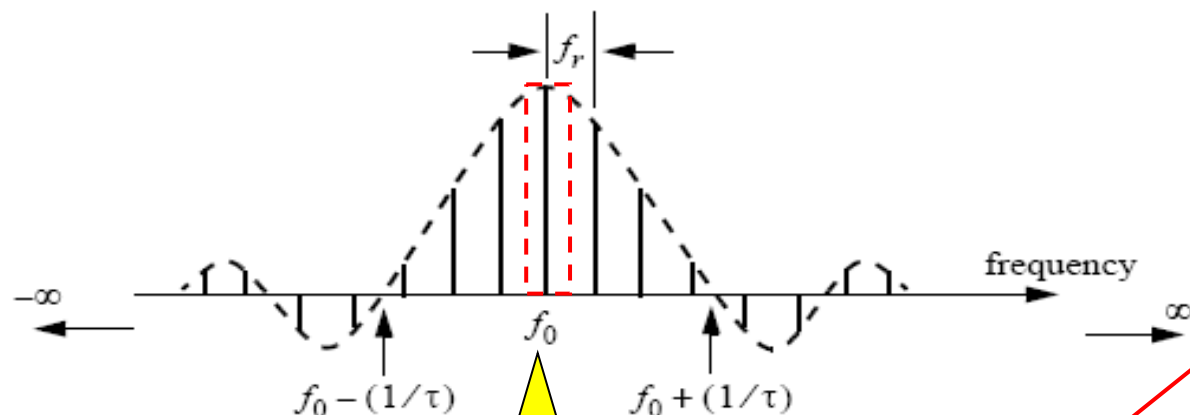
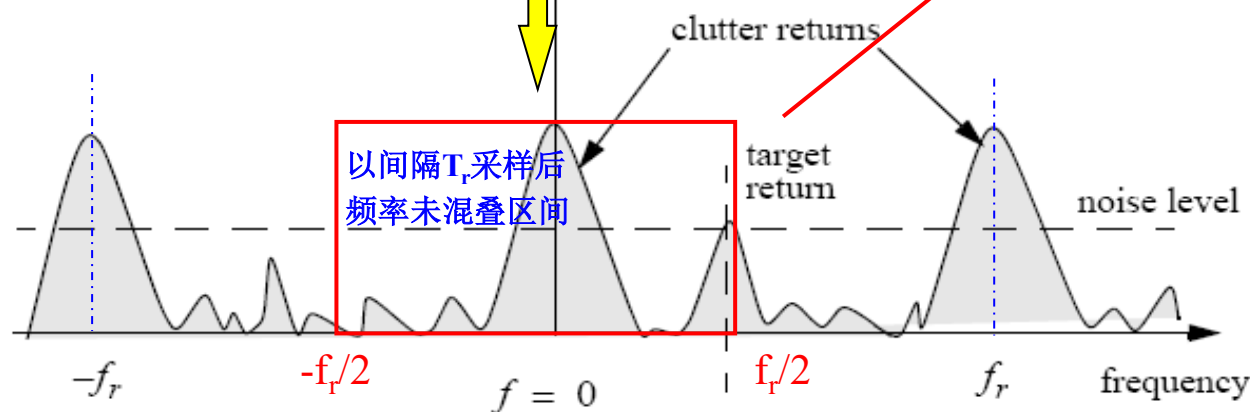


Figure 3.4. Amplitude spectrum for a coherent pulse train of infinite length.

spectrum



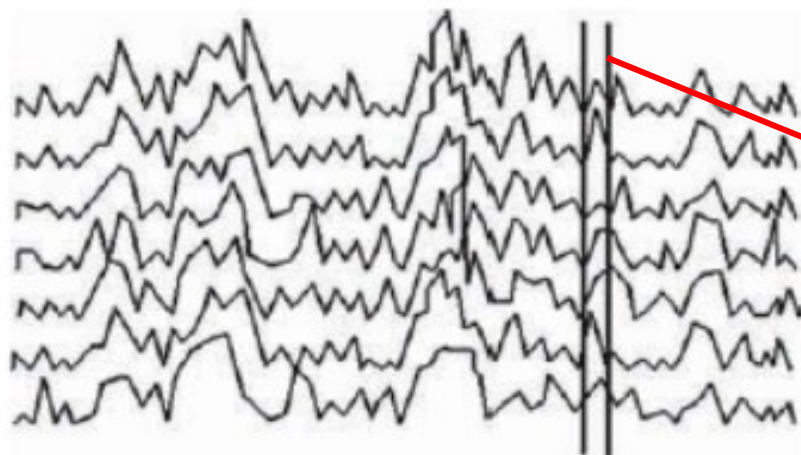
由于脉冲按 f_r 取样，则实际回波谱为上述周期谱的周期重复出现且幅度受Sinc函数调制。该图不十分准确：

- 1) 目标在其他周期未出现;
- 2) 不同周期幅度无变化。

有效频谱范围在 $[-f_r/2, f_r/2]$ ，前述脉冲雷达输出的近似是合理的

Figure 7.1. Typical radar return PSD when clutter and target are present.

多普勒测速（距离变化率）

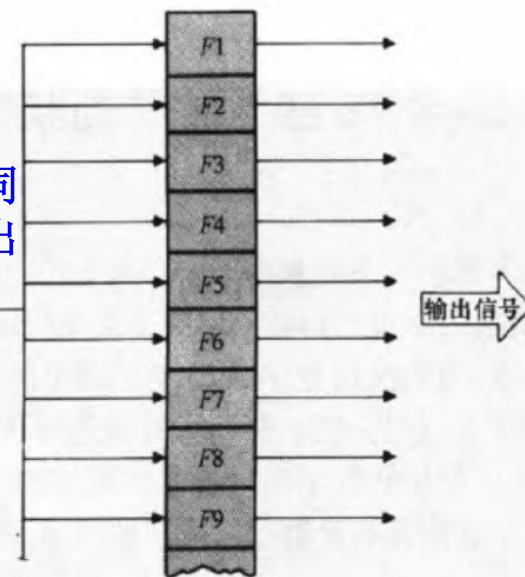


Pulse no

1
2
3
4
5
6
7
.
.
.

同一距离不同
脉冲采样输出

输入信号



多普勒滤波器组

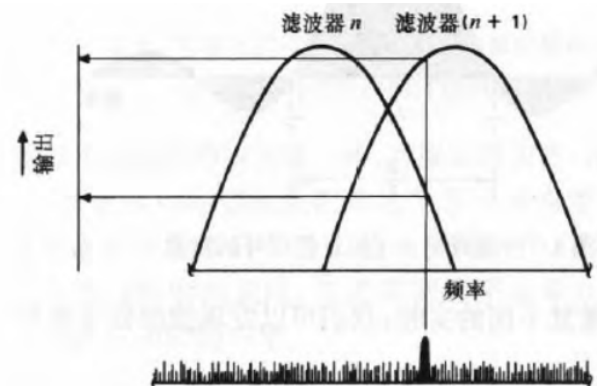
$[-f_r/2, f_r/2]$

$$f_d = F_d + kf_r$$

$$R = R_{\text{视在}} + k \frac{cT_r}{2}$$

$$f_r T_r = 1$$

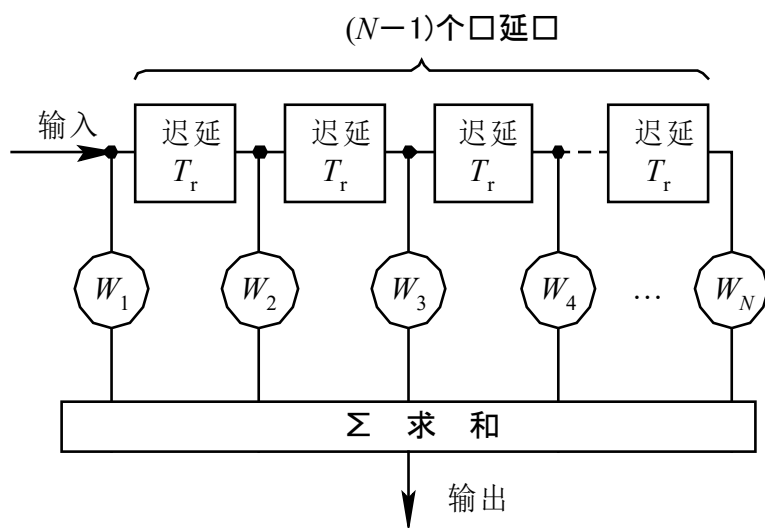
脉冲雷达测速模糊和测距模糊是矛盾的



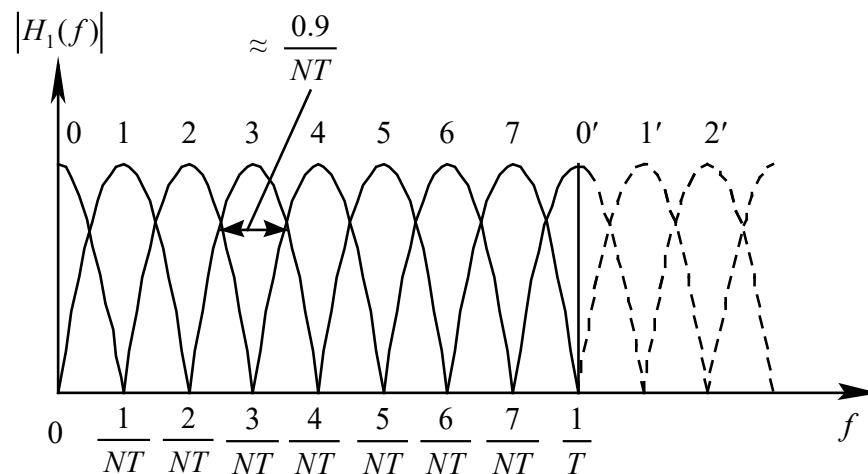
■ 多普勒滤波器组的实现方法

- ❑ 硬件： N 抽头横向滤波器，各脉冲加权后求和
- ❑ 实际： N 点加窗DFT实现，第 k 个滤波器中心频移：

$$\frac{2f_d}{f_r} = \frac{2k}{N} \Rightarrow f_d = \frac{k f_r}{N} \quad (n = -N/2-1, \dots, -1, 0, 1, \dots, N/2)$$



(a)

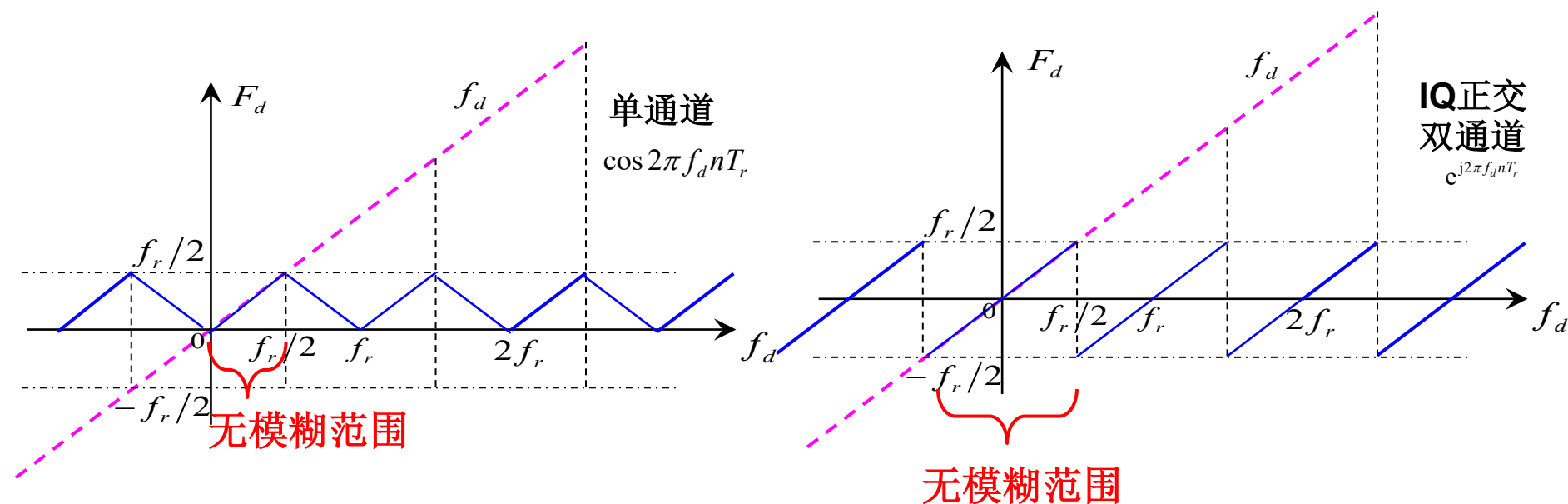


(b)

横向滤波器

■ 多普勒模糊（测速模糊）

- 多普勒滤波器组频率覆盖范围： $-f_r/2 \sim f_r/2$
- $|f_d| > f_r/2$ 时，频率混迭 \Rightarrow 多普勒模糊
- 解模糊：采用多重脉冲重复频率（提高最大不模糊范围）



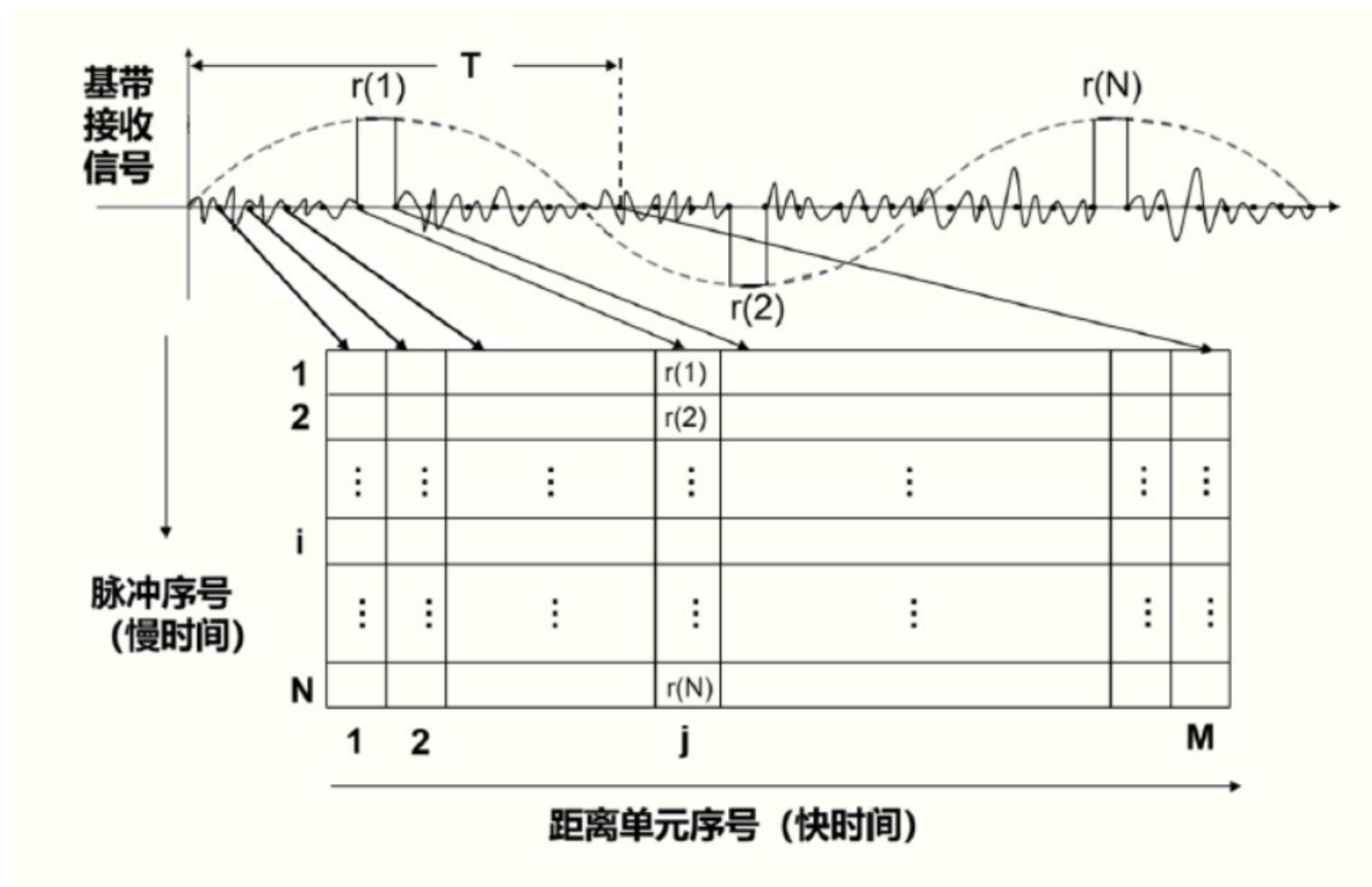
抑制固定杂波的方法

抑制固定杂波、实现动目标检测的方法主要有：

➤ 延时线对消器

广泛用于MTI雷达中，优点：单个网络可工作在所有的距离范围。

➤ 距离门多普勒滤波器



脉冲雷达的回波信号形式

固定目标：等幅脉冲串



连续波情况下的目标回波信号：

$$\cos[-\omega_0 t_R] = \cos[-4\pi R(t)/\lambda]$$

1、固定目标

$$\text{相位差 } \varphi = -\omega_0 t_R = -2\omega_0 R_0/c = -\varphi_0$$

$\cos\varphi = \cos\varphi_0$ 可能取包括零在内的从+1到-1的任何固定数值，即脉冲雷达相位检波器的输出为**一等幅脉冲串**。

2、运动目标

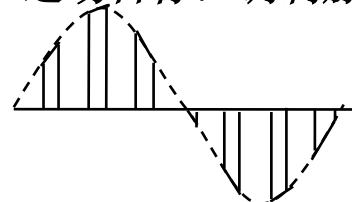
$$\text{相位差 } \varphi = -\omega_0 t_R = -2\omega_0 (R_0 - v_r t)/c$$

$\cos\varphi = \cos(\omega_d t - \varphi_0)$ ，脉冲雷达回波是按脉冲重复周期对此差拍多普勒频率信号进行矩形取样输出，存在两种情形(设脉冲宽度 τ ，脉冲重复周期 T_r ，脉冲重复频率 $f_r = 1/T_r$)：

单通道处理：对函数 $\cos(\omega_d t - \varphi_0)$ 在 $T=0, T_r, 2T_r, \dots$ 时间点的采样

双通道处理：对函数 $\exp(j(\omega_d t - \varphi_0))$ 在 $T=0, T_r, 2T_r, \dots$ 时间点的采样

运动目标：调制脉冲



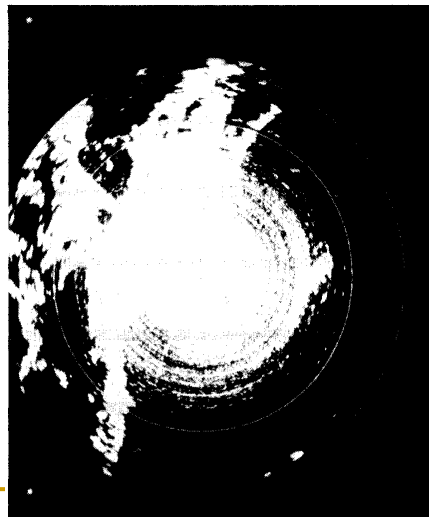
■ MTI（动目标显示）雷达原理

- ❑ 固定目标：等幅脉冲串，脉间相差0
- ❑ 运动目标：调幅脉冲串，脉间相差 $2\pi f_d T_r$



相邻脉冲**相减**滤除固定杂波，保留运动目标

- ❑ 滤除固定杂波后，原来被强杂波背景淹没的运动目标回波信号将在终端显示器上显现出来，故称**动目标显示**



(a)



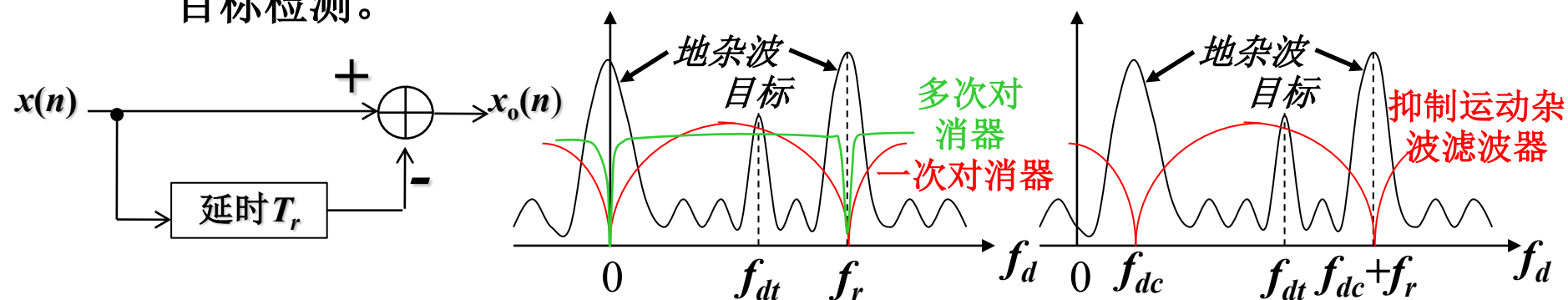
(b)

FIG. 15.1 (a) Normal video. (b) MTI video. These PPI photographs show how effective an MTI system can be. Aircraft appear as three consecutive blips in the right-hand picture because the camera shutter was open for three revolutions of the antenna. The PPI range is 40 nmi.

◆ 动目标显示滤波器

对消器：一次对消器，二次对消器，多次相消器，抑制运动杂波滤波器。

对消器阶数越多，滤波器凹口可以设计得越窄，越有利于低速动目标检测。



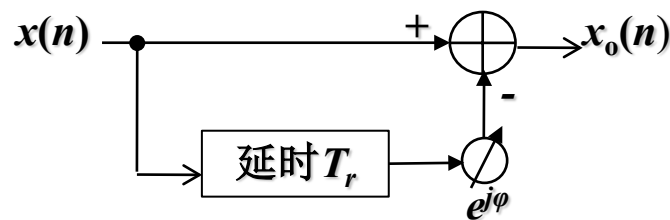
一次对消器的频率响应：

$$x_o(n) = x(n) - x(n-1) \text{ 或 } x_o(t) = x(t) - x(t - T_r)$$

$$H(f_d) = 1 - e^{j2\pi f_d T_r} \Rightarrow |H(f_d)| = 2|\sin(\pi f_d T_r)|$$

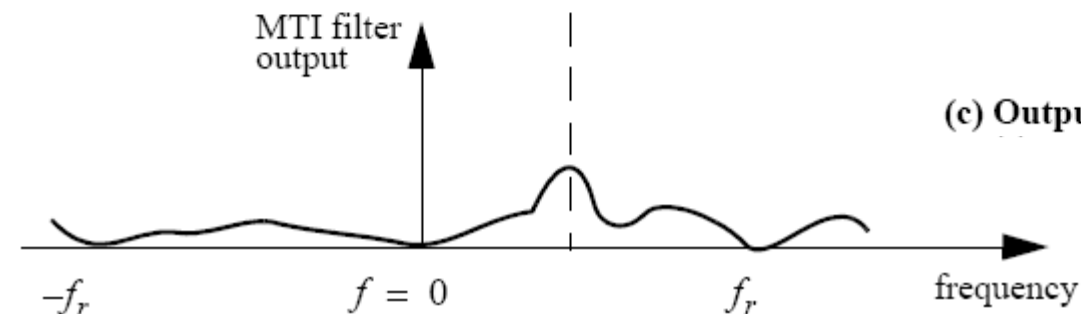
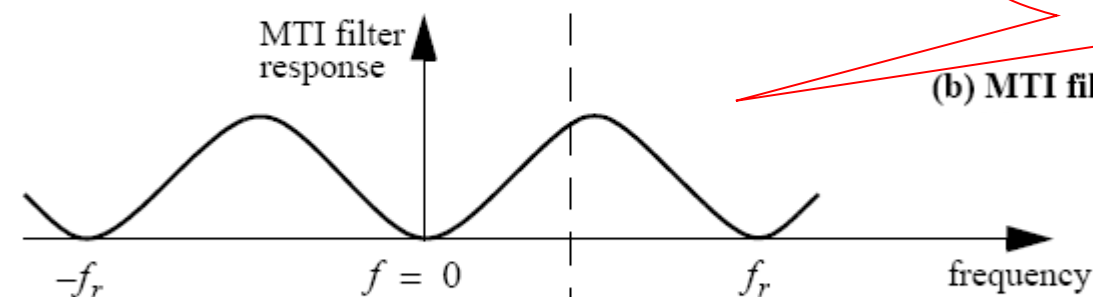
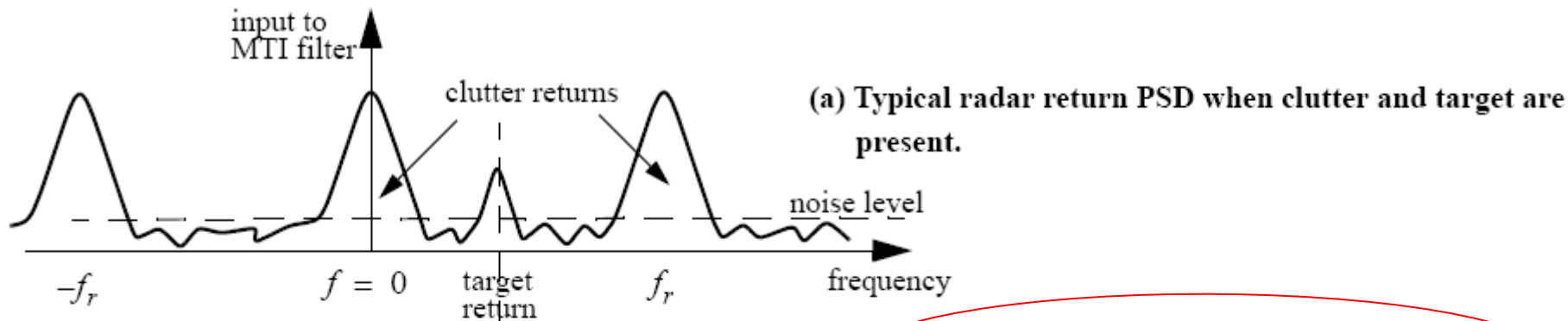
抑制运动杂波滤波器的频率响应：

$$H(f_d) = 1 - e^{j(\varphi + 2\pi f_d T_r)} \Rightarrow |H(f_d)| = 2\left|\sin\left(\frac{\varphi}{2} + \pi f_d T_r\right)\right|, \text{ 故 } \varphi = -2\pi f_{dc} T_r$$



盲速分析:

从单延时线对消器的幅频特性可看出当 $f_d = kf_r$ (式中 $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$)时, 延时线对消器的响应为零, 即延时线对消器不仅抑制固定杂波引起的零频成份, 而且当运动目标的多普勒频率 f_d 等于脉冲重复频率 f_r 的整数倍时也被抑制掉, 这正对应盲速。



双延时线对消器频率响应

盲速的消除方法

盲速 $v_r = k\lambda f_r / 2$ 是脉冲体制雷达的固有缺点，连续波雷达并不存在此问题，其根源在于对脉冲重复频率获得的离散样本进行多普勒频率滤波。一般要求 λf_r 较大以消除盲速，即

1、雷达工作波长 λ 增加 \rightarrow 若天线尺寸一定则天线波束宽度变宽，角分辨力和角精度下降。

2、提高脉冲重复频率 $f_r \rightarrow$ 引起距离模糊。

最大不模糊速度与最大不模糊距离之间的关系

实际中二者难以兼顾，
必须解速度模糊或解距离模糊

消除盲速的主要方法有：

$$\left. \begin{aligned} f_{d\max} &= \frac{2v_{r\max}}{\lambda} = \frac{f_r}{2} \\ R_{\max} &= \frac{cT_r}{2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow R_{\max} v_{r\max} = \frac{c\lambda}{8}$$

➤ 多个脉冲重复频率

➤ 多个射频

采用多个射频减小盲速的影响的基本原理与采用多个脉冲重复频率类似，这是因为第一盲速 $v_r = \lambda f_r / 2 = c / (2f_0 T_r)$ 中载频 f_0 与脉冲重复周期 T_r 处于同等地位。因此基于相同的原理，采用多个射频也可获得更大的第一盲速。

参差脉冲重复频率消除低盲速

两部工作在同一频率的独立的雷达，若两者重复频率不同，则二者的盲速也不同。因此，如对某部雷达一些运动目标处于盲速，那么对另一部雷达就不一定同时处于盲速。如果单部雷达用时分方式，其重复频率在两个或更多个值之间跳变(多重重复频率)，则用一部雷达代替两部独立的雷达也能得到与上面同样的结果。脉冲重复频率可以隔一次扫描转换一次，或每次天线波束扫到半个波束宽度时转换一次，或每隔一个脉冲其脉冲重复频率都改变一次。当脉冲到脉冲之间进行转换时，通常称为参差重复频率(脉间参差)。

优点：

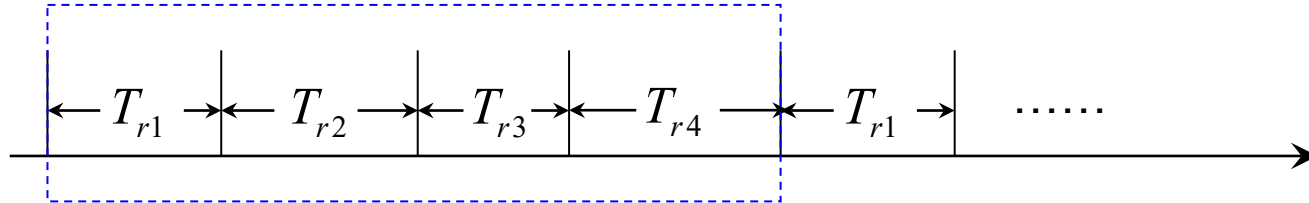
当采用两个或多个脉冲重复频率工作时，只有当每个重复频率的盲速重合时才会出现零响应——可使第一盲速提高。

缺点：

虽然用多于一个重复频率可使第一盲速提高，但一般在合成的通带内可能出现低灵敏度的区域。

选择多个脉冲重复周期/频率的比值应按第一盲速及滤波器通带内各零值的深度两方面的要求折衷确定。

参差脉冲重复频率的频率响应



脉间参差示意图(四个不同的脉冲重复周期)

设有N个参差的脉冲重复周期 T_{r1} 、 T_{r2} 、...、 T_{rN} ，对应的N+1个回波脉冲的加权系数为 w_0 、 w_1 、...、 w_N ，则此滤波器的频域响应为：

$$H(f) = w_0 + w_1 e^{j2\pi f T_{r1}} + w_2 e^{j2\pi f (T_{r1} + T_{r2})} + \dots + w_n e^{j2\pi f (T_{r1} + T_{r2} + \dots + T_{rN})}$$

式中权系数 w_n ， $n=0,1,2,\dots,N$ 取决于用于N+1个脉冲的延时线对消器或最优设计结果。如当N=2时对应两个参差脉冲重复频率，需要对连续三个脉冲进行加权处理，若采用双延时线对消器，对应的加权系数为1、-2，1。

两脉冲重复频率情形

设两个脉冲重复周期分别为 T_{r1} 、 T_{r2} ，且满足

$$T_{r1}/T_{r2}=n_1/n_2$$

其中 n_1 、 n_2 为整数。

分别采用 T_{r1} 、 T_{r2} 时的第一盲速的多普勒频率分为：

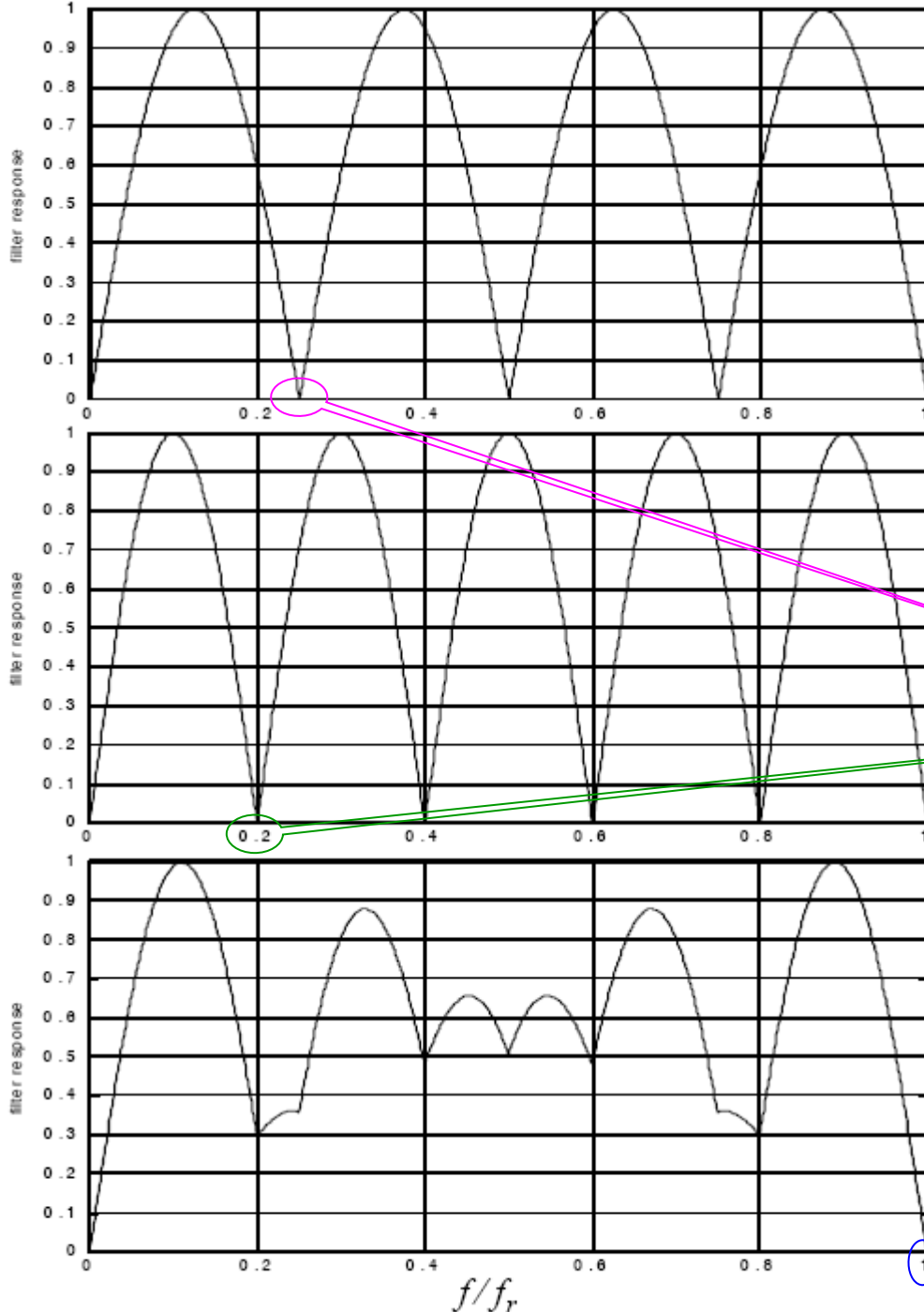
$$f_{r1}=1/T_{r1}、f_{r2}=1/T_{r2}$$

同时采用 T_{r1} 、 T_{r2} 时获得的第一盲速的多普勒频率为：

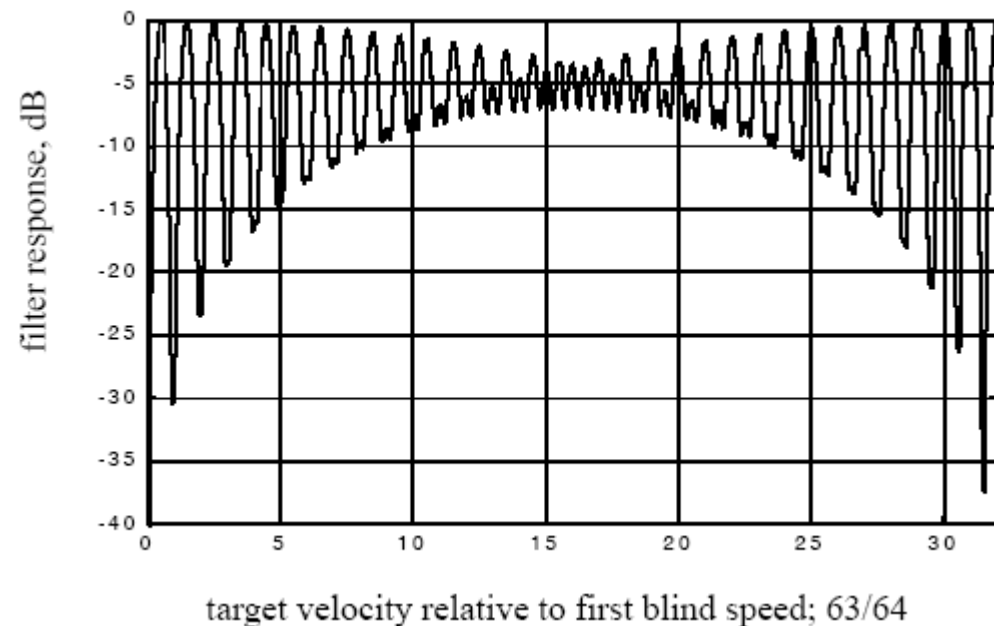
$$f_r=n_1f_{r1}=n_2f_{r2} \text{ 或 } n_1/T_{r1}=n_2/T_{r2}$$

本例中 $n_1=4, n_2=5$

(两单延时线对消器幅频特性之和)



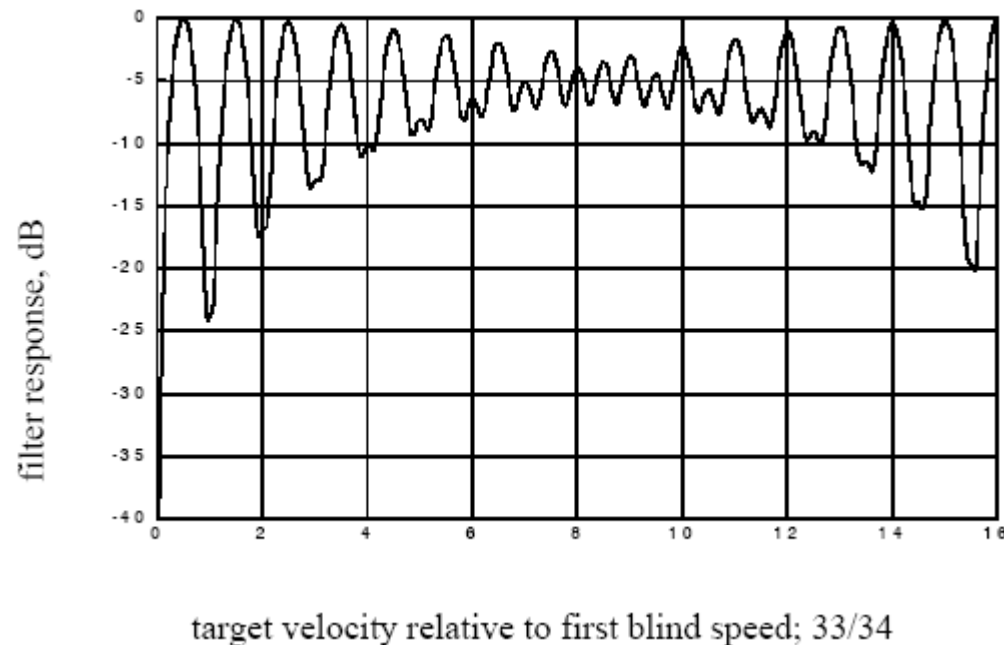
Frequency responses of a single canceler. Top plot corresponds to T_1 , middle plot corresponds to T_2 , bottom plot corresponds to stagger ratio $T_1/T_2 = 4/5$



$n_1/n_2=63/64$ 时，仅画出左对称部分，右半对称部分未画出，对称点 $v/v_B=(63+64)/4=31.75$

此两图是采用双延时线对消器(加权系数为1、-2、1)的两参差脉冲重复频率MTI滤波器幅频特性 $H(f)$

$n_1/n_2=33/34$ 时，仅画出左对称部分，右半对称部分未画出，对称点 $v/v_B=(33+34)/4=16.75$



多个脉冲重复频率情形

实际要求:

第一等效盲速值要尽可能覆盖目标可能出现的速度范围

在该速度范围内响应曲线比较平坦

一般而言, 上述两个要求是相互矛盾的, 如上页 $n_1/n_2=63/64$, $33/34$ 时两参差脉冲重复周期时的MTI幅频特性曲线: 盲速提高倍数愈多, 则合成曲线愈不平坦, 特别是在原来的第一凹点深度愈大。改进的方法是采用多个交替脉冲重复周期的方式工作, 各零值的深度可减少, 而第一盲速将增加。不妨设 N 个参差脉冲重复周期存在如下关系:

$$T_{r1}/n_1=T_{r2}/n_2=\dots=T_{rN}/n_N=T_r \quad \text{即} \quad f_r=n_1f_{r1}=n_2f_{r2}=\dots=n_Nf_{rN}$$

式中 n_1, n_2, \dots, n_N 为不存在除1以外其他公因子的正整数(一般取值比较接近)

设非参差脉冲的第一盲速 v_B 对应各参差周期的平均值 $T_{rav}=(T_{r1}+T_{r2}+\dots+T_{rN})/N$, 则参差脉冲周期的第一盲速 v_1 与非参差脉冲的第一盲速 v_B (按周期的平均盲速)之比为:

$$\frac{v_1}{v_B} = \frac{1/T_r}{1/T_{rav}} = \frac{n_1 + n_2 + \dots + n_N}{N}$$

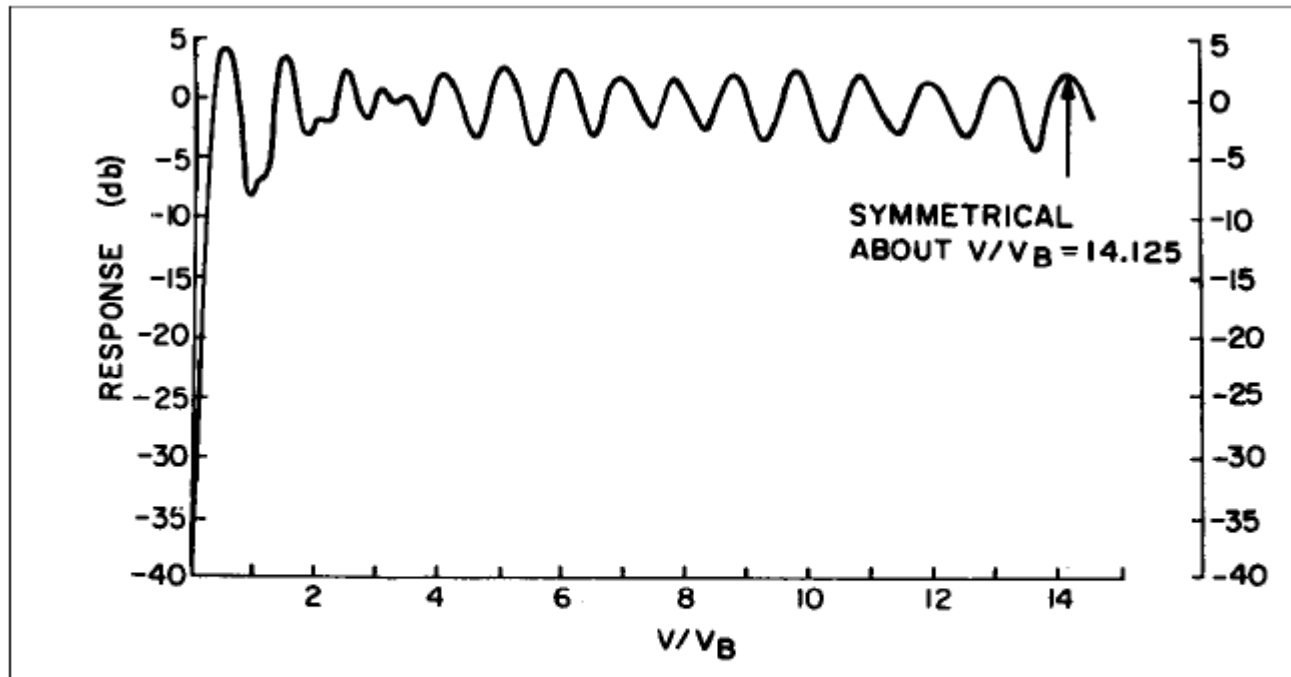


Figure M30 Velocity response of typical staggered PRF MTI canceler (from Skolnik, 1970, Fig. 42, p. 17.40, reprinted by permission of McGraw-Hill).

上图是四参差脉冲重复周期(五脉冲对消器)的结果，脉冲重复周期比为

25:30:27:31

因此所获得的 $v_1/v_B = (25+30+27+31)/4 = 28.25$ ，其对称点为14.125。

提高第一盲速与解测距模糊的理论比较

采用多个脉冲重复频率以提高第一盲速的方法与我们以前讲述的利用多个脉冲重复频率解测距模糊的问题(基于孙子定理)非常相近, 现比较如下:

1、第一盲速 $v_r = \lambda f_r / 2 = \lambda / 2 T_r$

$$\frac{T_{r1}}{n_1} = \frac{T_{r2}}{n_2} = \dots = \frac{T_{rN}}{n_N} = T_r$$

各脉冲重复周期 T_{ri} , $i=1,2,\dots,N$ 太大, 可获得的第一盲速均太小(f_{ri} 太小而出现测速模糊)。参差重复周期法相当于获得其**最大公约数 T_r** 对应的第一盲速, 即取 $f_{r1}, f_{r2}, \dots, f_{rN}$ 的最小公倍数。

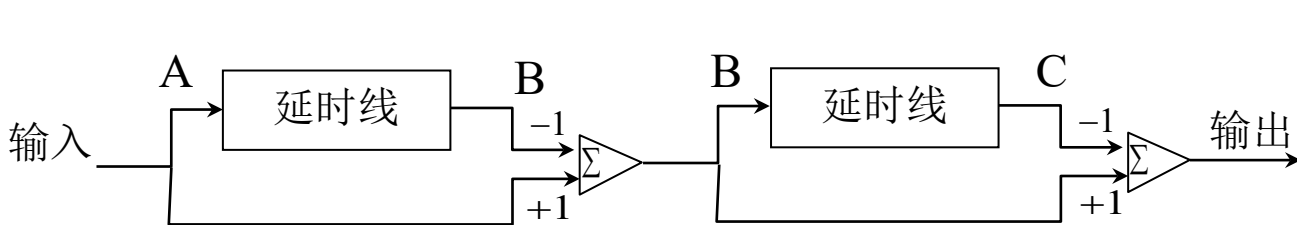
2、最大无模糊距离 $R_{\max} = c T_r / 2$

$$\frac{T_{r1}}{m_1} = \frac{T_{r2}}{m_2} = \dots = \frac{T_{rN}}{m_N} = \tau = \frac{T_r}{m_1 m_2 \dots m_N}$$

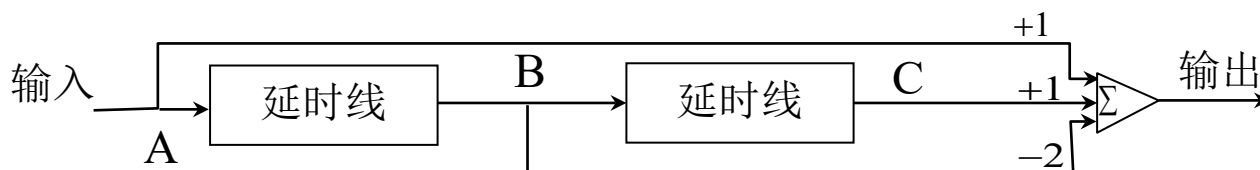
各脉冲重复周期 T_{ri} , $i=1,2,\dots,N$ 太小从而出现测距模糊, 利用孙子定理相当于获得其**最小公倍数 T_r** 对应的最大无模糊距离。

由以上可知, 实际中两者几乎不会同时使用, 主要原因是测距模糊(T_r 较小)与测速模糊(T_r 较大)是一对矛盾, 一般不会同时存在测距、测速模糊。

双延时线对消器(三脉冲对消器)



(a) 双延时线对消器



(b) 三脉冲对消器

双延时线对消器由两个单延时线对消器级联构成，其输出为：

$$f(t) - f(t - T_r) - f(t - T_r) + f(t - 2T_r) = f(t) - 2f(t - T_r) + f(t - 2T_r)$$

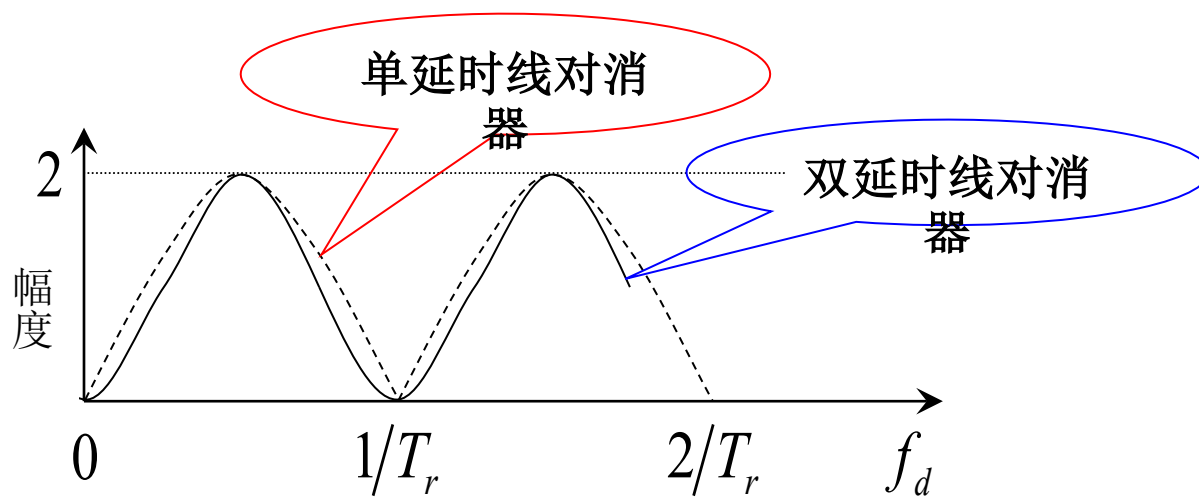
这样可将信号 $f(t)$ 及其连续两个脉冲重复周期后的信号同时加到相加器上，一个脉冲重复周期后的信号加权系数为-2，然后再加上两个脉冲重复周期后的信号，此结构称为三脉冲对消器。显然两者具有相同的频率特性。

双延时线对消器的幅频特性

双延时线对消器由两个单延时线对消器级联构成，其频率响应为单延时线对消器幅频特性的平方，即

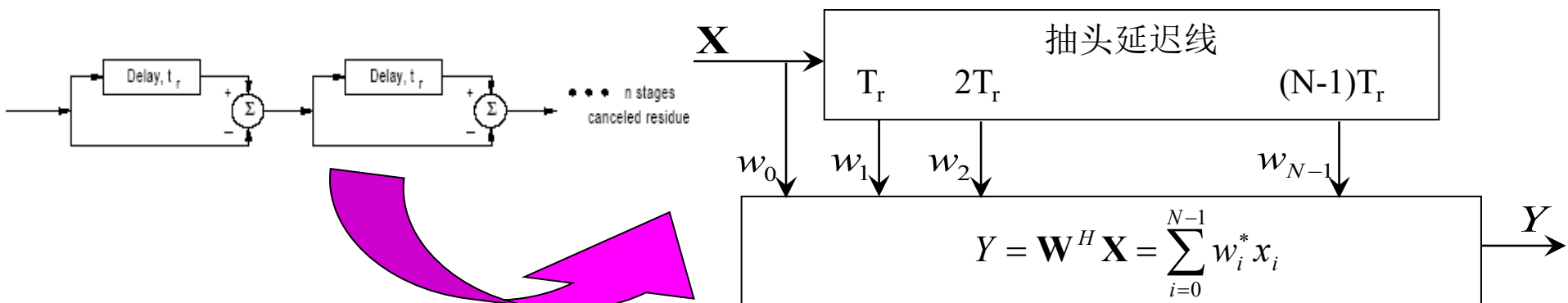
$$4 \sin^2 \pi f_d T_r = 2(1 - \cos 2\pi f_d T_r)$$

可见双延时线对消器的频率响应周期为 f_r ，比单延时线对消器对杂波有进一步的对消效果，如下图，虚线为单延时线对消器幅频特性，实线为双延时线对消器幅频特性。但是在杂波抑制凹口加宽的同时，可检测的动目标多普勒频率范围减小了，尤其是多次对消时。



多延时线对消器——FIR

具有 $N-1$ 个延时线的 N 个脉冲的横向滤波器(Transversal Filter)的一般形式如下图，此为**非递归滤波器(Nonrecursive Filter)**：



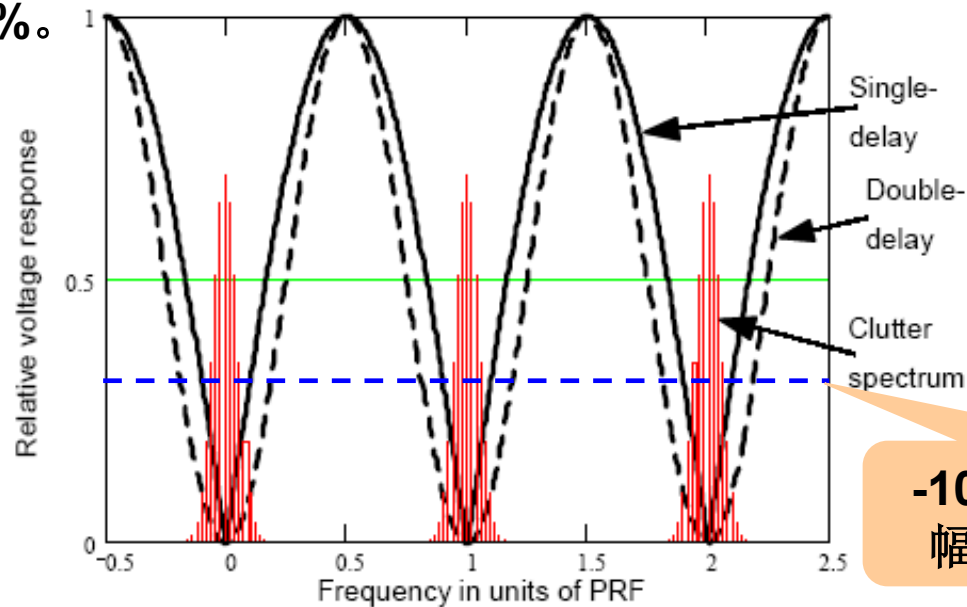
用两条延时线组成的三脉冲对消器是一种横向滤波器，它的权系数为 $1, -2, 1$ ，其频率响应函数为 $\sin^2 \pi f_d T_r$ 。具有三条延时线的横向滤波器的加权系数为 $1, -3, 3, 1$ ，其幅频响应函数为 $\sin^3 \pi f_d T_r$ ，这是一种四脉冲对消器。可以类推，由 $N-1$ 条延时线构成的横向滤波器(N 脉冲对消器)的频率特性为 $\sin^{N-1} \pi f_d T_r$ ，其权系数是 $(1-x)^{N-1}$ 展开式的系数，即为交变符号的二项式系数：

$$w_i = (-1)^i \frac{(N-1)!}{(N-1-i)!i!} \quad i = 0, 1, \dots, N-1$$

上述非递归滤波器的缺点：

在零频、重复频率及其谐波处的凹口宽度也随着延时线数目增加而加宽，虽然增加延时线数目能减少杂波，但由于通带变窄了，发现运动目标的数目也减少了。

若以滤波器特性的**-10dB**作为发现目标的门限，并假定目标在多普勒频带范围内均匀分布，则两脉冲对消器将抑制掉目标的**20%**，三脉冲对消器抑制掉**38%**，四脉冲对消器抑制掉**48%**。



$-10\text{dB}=20\lg(10)^{-1/2}$ ，即
幅度为 $(10)^{-1/2}=0.3162$

上述滤波器所基于的最佳准则与目标的信号特性无关，因此这并不一定是设计动目标显示滤波器恰当的准则。理想的滤波器应具有如下响应形式：能抑制零频及重复频率以及它的各次谐波周围的杂波，但在无杂波的范围内具有平坦的响应。

带反馈的单延时线对消器——IIR

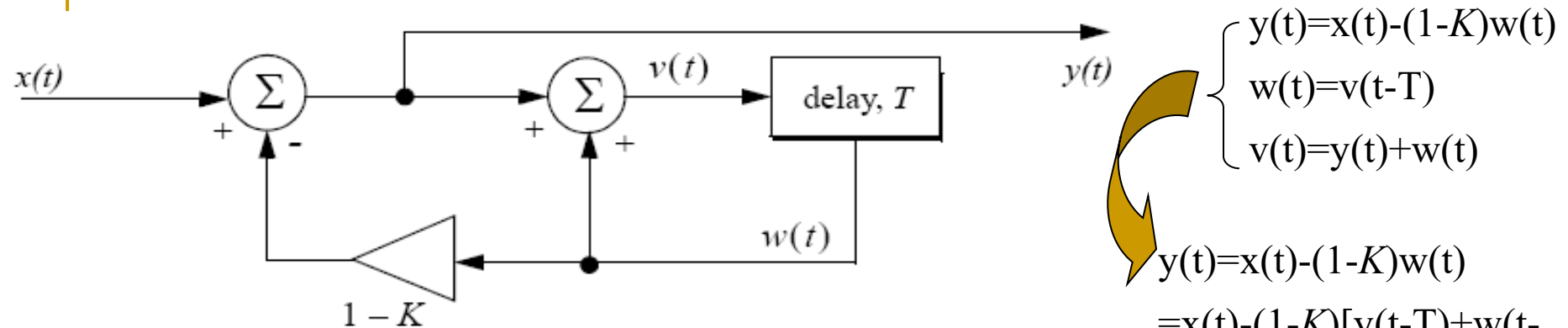
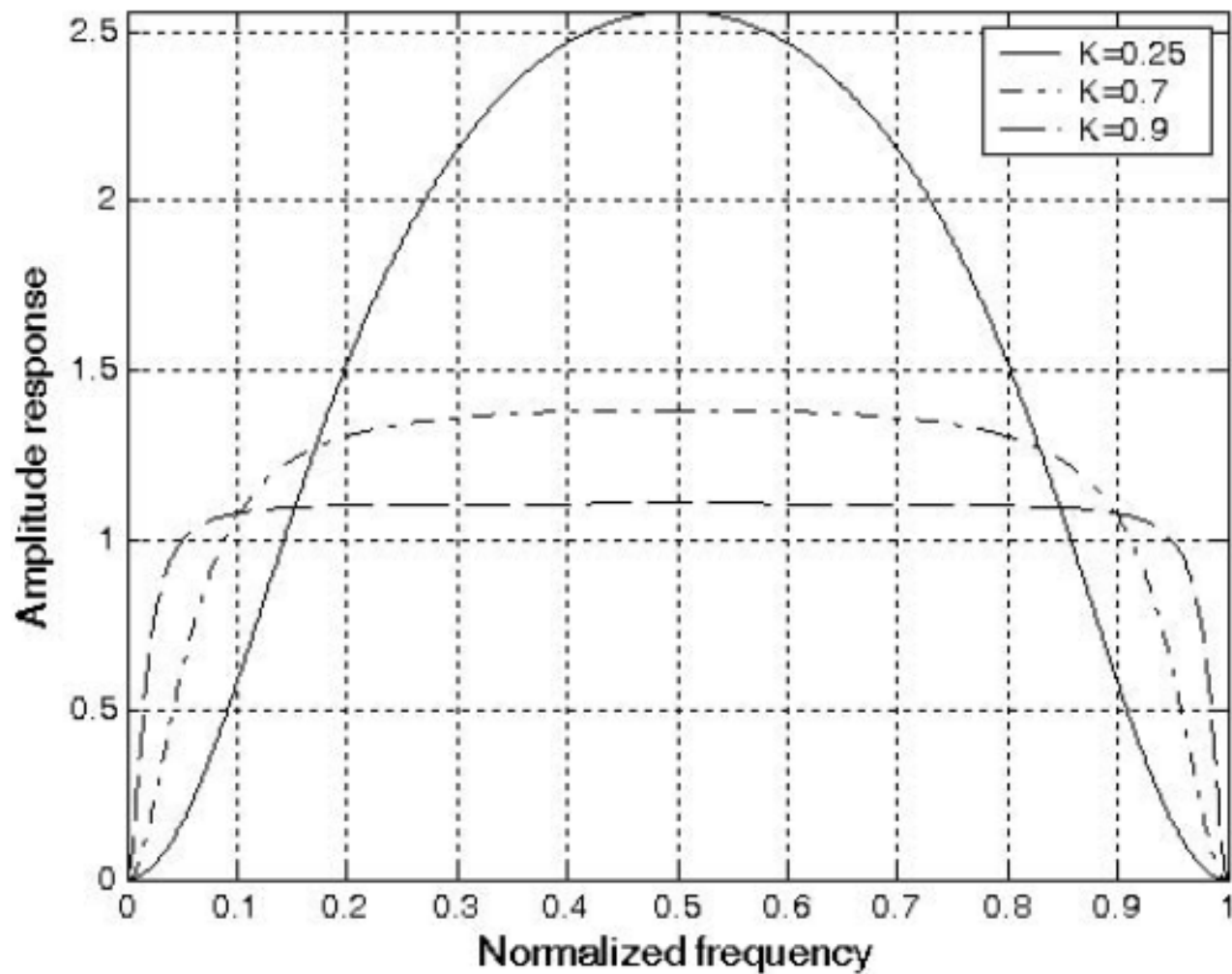


Figure 7.8. MTI recursive filter.

Delay line cancelers with feedback loops are known as recursive filters. The advantage of a recursive filter is that through a feedback loop we will be able to shape the frequency response of the filter. As an example, consider the single canceler shown in Fig. 7.8. From the figure we can write

$$\text{the transfer function } H(z) = Y(z)/X(z) = \frac{1 - z^{-1}}{1 - Kz^{-1}}$$

$K=0$ 时 $H(z)=1-z^{-1}$ 退化为单延时线对消器



$$|H(e^{j\omega T})|^2 = \frac{2(1 - \cos \omega T)}{(1 + K^2) - 2K \cos(\omega T)}$$

带反馈的双延时线对消器——IIR

A double-delay feedback canceler is a double-delay canceler in which the feedback is added to adjust the shape of the filter passband, as shown in Fig. C2. The addition of feedback around the canceler makes it possible to reduce the width of the notch, and, to a large extent, to preserve the cancellation characteristics of the double-delay system in the immediate vicinity of the *blind speed*. *SAL*

Ref.: Barton (1964), p. 220.

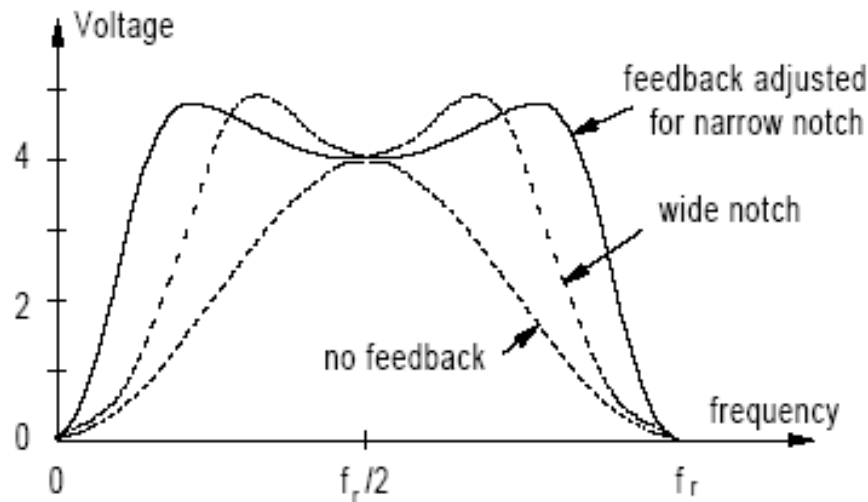


Figure C2 Frequency response of a double-delay canceler with and without feedback (after Barton, 1964, p. 220).

N+1脉冲非递归延时线对消器有**N**个零点(**FIR**)，它只用了前馈回路。若在用前馈回路的同时加上反馈回路，则**每条延时线可有一个极点和一个零点**。采用反馈回路的滤波器称为递归滤波器(**IIR**)，从原理上讲几乎可设计出任何频率响应函数，但其致命的缺点在于**其暂态响应比较长**，这限制其应用。

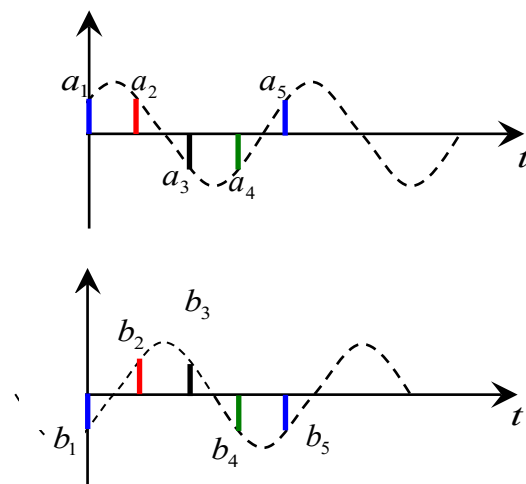
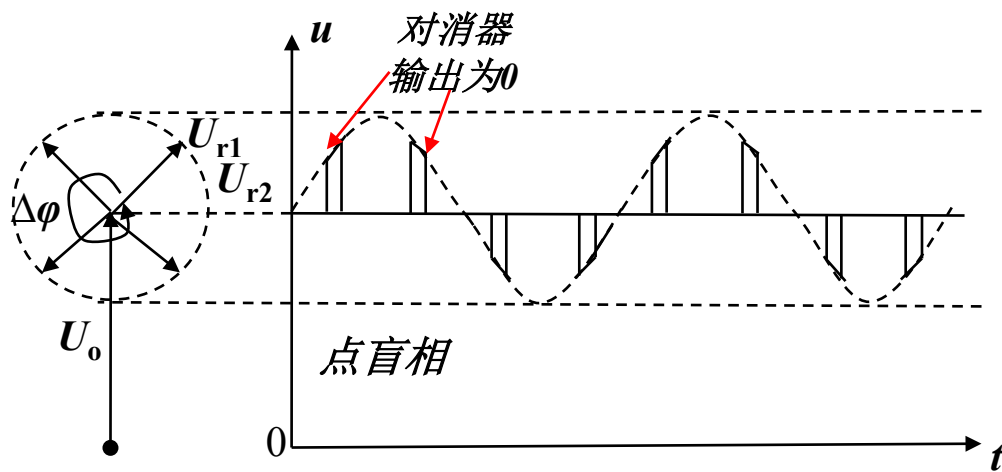
数学分析方法：**Z变换**

运动目标检测及测速——盲速、盲相的影响及解决途径

盲相：包括点盲相和连续盲相

点盲相：

在某些相邻脉冲回波幅度相等，经对消器对消后输出为0



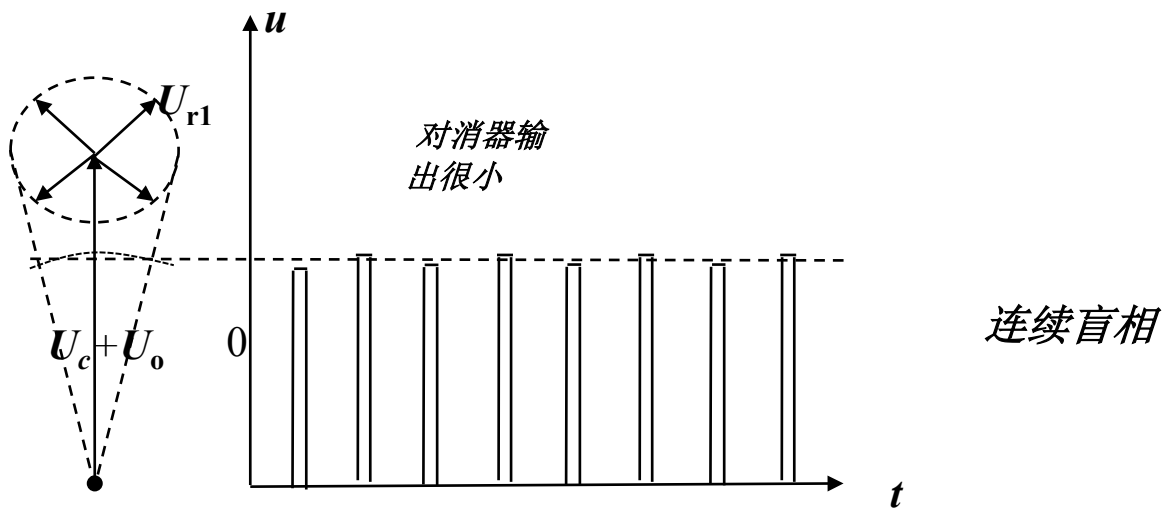
原因：脉冲雷达回波是对连续波雷达回波的采样

盲相的根本原因是对消器输出为相邻重复周期回波信号差矢量在基准电压方向投影所造成。因此若不进行投影，直接取出差矢量，就可以解决盲相问题

运动目标检测及测速——盲速、盲相的影响及解决途径

连续盲相：

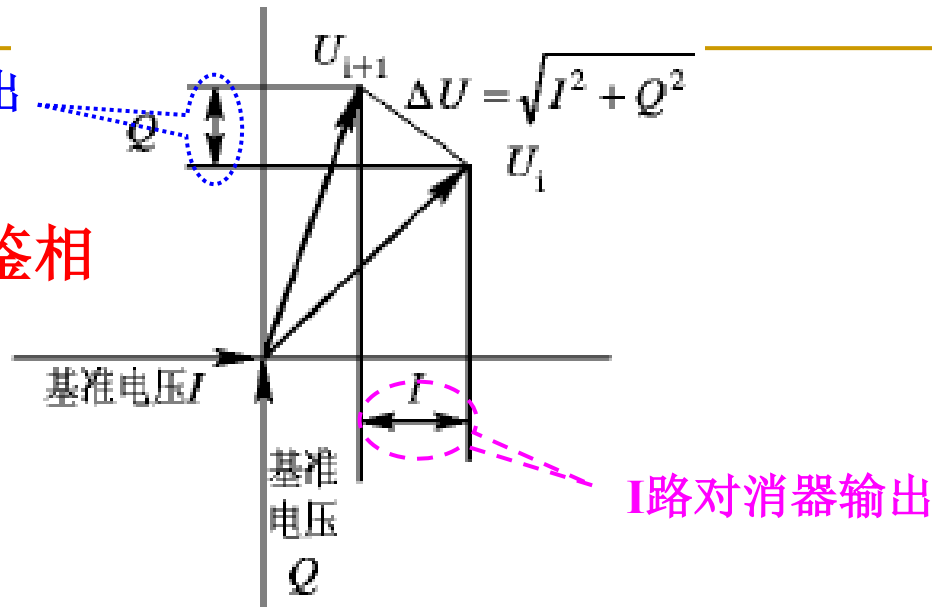
相邻脉冲回波幅度几乎相等，经对消器对消后输出幅度小



原因：在强杂波或干扰背景下，经过限幅器后输出脉冲幅度几乎不变。

Q路对消器输出

盲相解决办法：IQ两路鉴相



零中频单个运动目标回波信号理论上为 $\exp(j\omega_d t) = \cos\omega_d t + j\sin\omega_d t$ ，它相当于一个在正交直角坐标系中旋转的单位矢量(正频率对应逆时针旋转，如下图)，此矢量在X,Y坐标轴上的投影 $\cos\omega_d t$ 、 $\sin\omega_d t$ 分别相当于正交双通道I,Q的输出，而相邻两个脉冲重复周期目标回波矢量相减构成的差矢量 Δu (单路延迟相消输出)在坐标轴X,Y上的投影分别对应正交双通道对消器的输出值。

下面通过几个特殊的例子利用单个动目标回波矢量图及对应的I、Q采样输出解释盲相、盲速的区别及联系。

MTI雷达的工作质量及质量指标

质量指标

1. 改善因子（IF）

$$I = \frac{S_o / C_o}{S_i / C_i} = \overline{G} \frac{C_i}{C_o}$$

2. 信杂比改善

对采用多个多普勒滤波器的杂波抑制系统，在每个滤波器对应的目标多普勒频率处定义信杂比改善。

3. 杂波中可见度（SCR）

定义为在给定发现概率和虚警概率条件下，检测到叠加在杂波上目标时的杂波与目标的功率之比。

■ 最优滤波器的频率响应

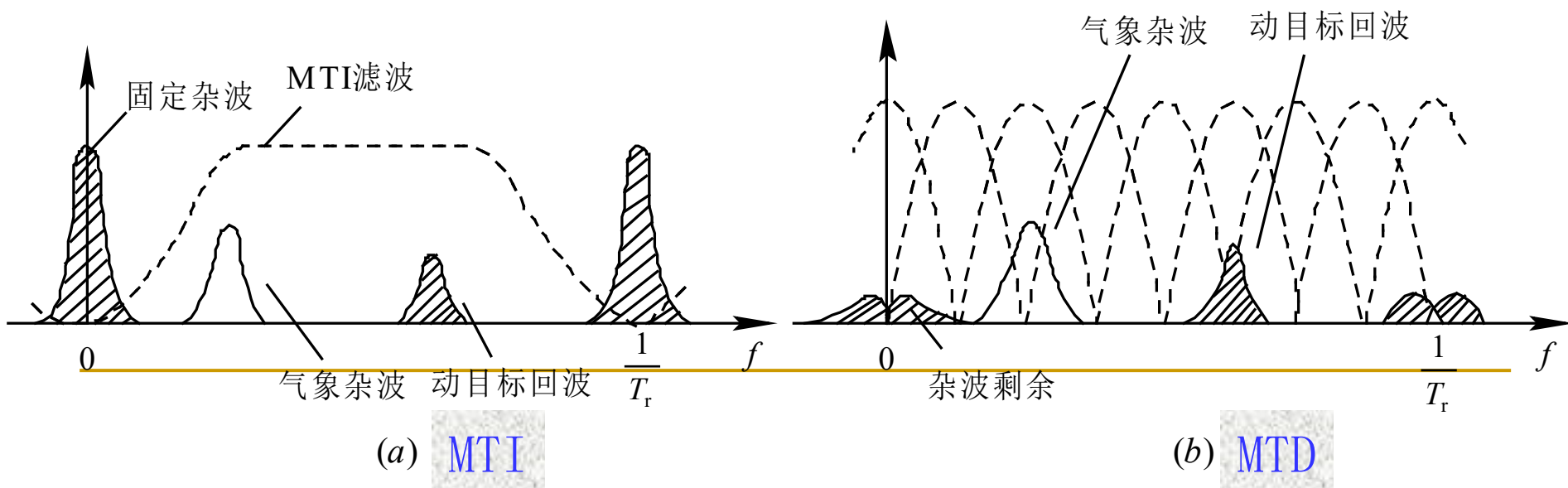
$$H(f, s) = \underbrace{H_M(f)}_{\text{波形匹配}} \underbrace{H_C(f)H_{M2}(f)}_{\text{多普勒处理}} \underbrace{G_C(s)G_T(s)G_R(s)}_{\text{空域处理或空域滤波}}$$

时域滤波

- $H_M(f)$: 单脉冲波形匹配滤波
 - $H_C(f)$: 多脉冲杂波对消
 - $H_{M2}(f)$: 窄带多普勒滤波, 脉冲串相参积累
- 窄带多普勒滤波器组频率覆盖范围: $-f_r/2 \sim f_r/2$

■ 动目标检测 (MTD)

- ❑ MTI 雷达改善因子一般在 20dB 左右
- ❑ 窄带多卜勒滤波器组：一组相邻且部分重叠的滤波器组覆盖整个多卜勒频率范围
- ❑ 白噪声时，窄带滤波器组使SNR提高 N 倍
- ❑ $MTD = MTI + \text{窄带多卜勒滤波器组}$



MTD雷达对MTI雷达的改进

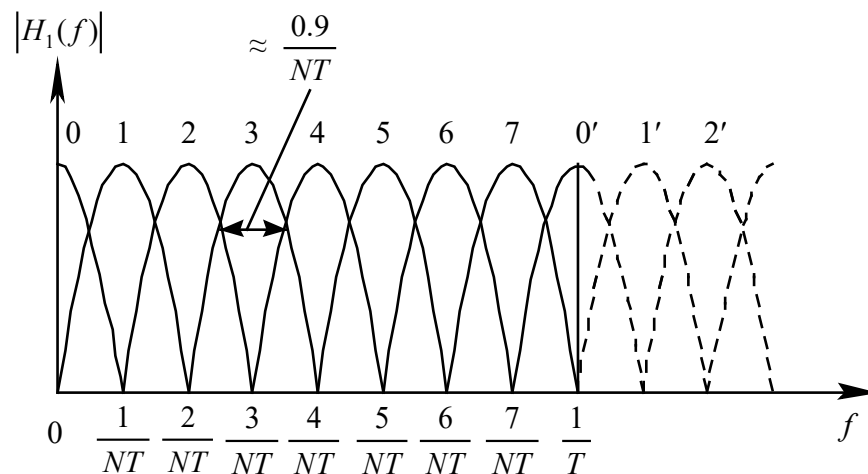
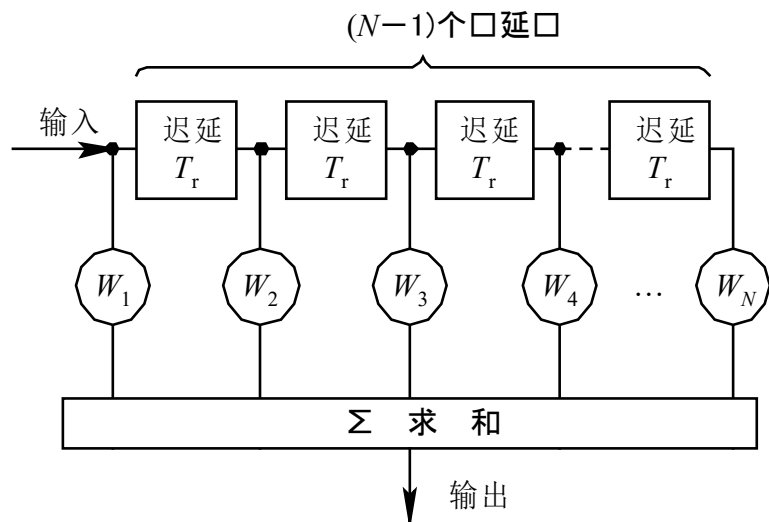
1. 增加了多普勒滤波器组，使系统接近于最佳匹配滤波，同时通过相参积累提高信杂比；
1. 增大了信号处理的线性动态范围；
对消器前的中放采用限幅中放，或采用线性MTI，用存储的杂波图控制中放增益。
3. 能抑制地杂波和运动杂波；
4. 能用杂波图检测切向飞行目标。

■ 多卜勒滤波器组的实现方法

- 硬件： N 抽头横向滤波器，各脉冲加权后求和
- 实际： N 点加窗DFT实现，第 k 个滤波器中心频移：

$$\frac{2f_d}{f_r} = \frac{2k}{N} \Rightarrow f_d = \frac{k f_r}{N}$$

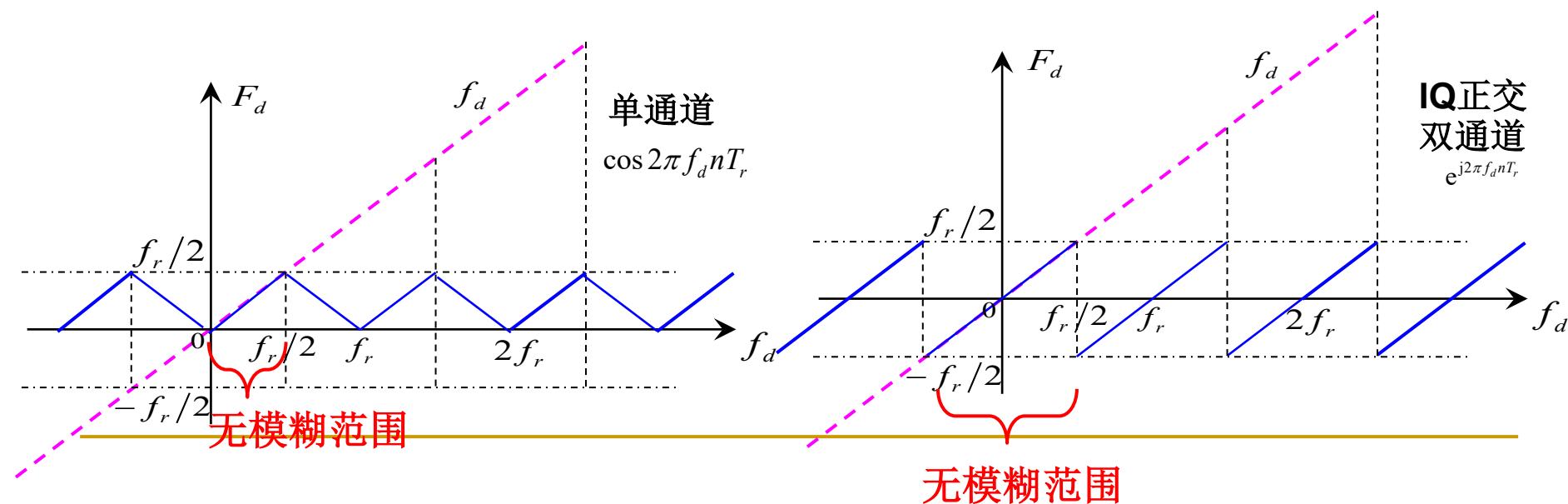
$$(n = -N/2-1, \dots, -1, 0, 1, \dots, N/2)$$



横向滤波器

- 脉冲多普勒（PD）雷达
 - 利用多普勒效应检测运动目标的脉冲雷达
 - 狭义定义，对付机载下视雷达的强杂波，特征
 - 采用HPRF，无速度模糊
 - 能实现多普勒滤波
 - 因HPRF，目标有距离模糊
 - 广义定义
 - 能实现对雷达信号脉冲串的多普勒滤波
 - 具有分辨运动目标速度的能力

- 多普勒模糊（测速模糊）
 - 多普勒滤波器组频率覆盖范围： $-f_r/2 \sim f_r/2$
 - $|f_d| > f_r/2$ 时，频率混迭 \Rightarrow 多普勒模糊
 - 解模糊：多重PRF配合中国余数定理，或HPRF
 - 多个同距同向目标解模糊，配对错误导致幻影
- 多普勒盲区（盲速 / 测速盲区）
 - MTI对消器 \Rightarrow 零多普勒附近成为多普勒盲区
 - 多普勒模糊时， $k f_r$ 附近的目标速度称为盲速
 - 减少多普勒盲区大小：多重PRF，或HPRF



■ PRF选取

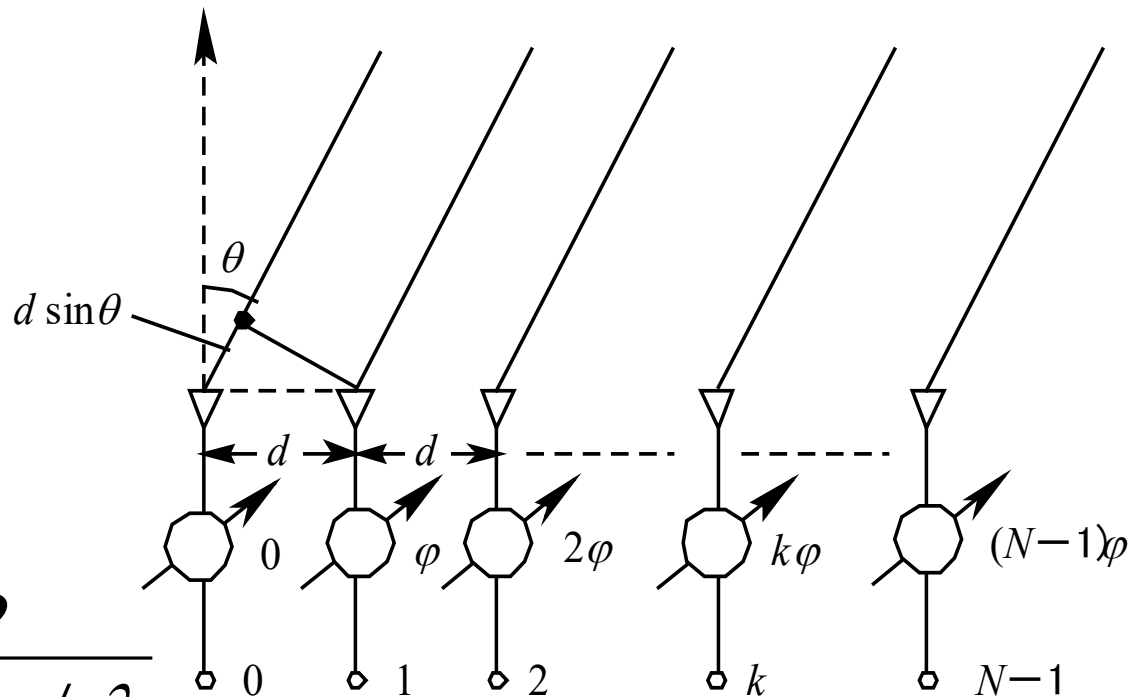
- ❑ HPRF: 测距模糊, 测速不模糊, 杂波强度高
- ❑ LPRF: 测距不模糊, 测速模糊
- ❑ MPRF: 测距、测速都有模糊, 杂波强度下降
 - 距离-多普勒二维盲区
- ❑ **8/3准则**: 一种常用的多重MPRF选择方案, 又称“3:8”准则, 即利用8个不同PRF中的3个来检测某一目标回波以避免距离-多普勒二维盲区
- ❑ 在选取的3个MPRF中, 2个用来解模糊, 第3个用来去幻影

运动目标检测及测速—习题

1. 描述盲速和频闪现象，说明出现盲速和频闪的条件。说明解决测速模糊的方法。
2. 描述MTI滤波器抑制杂波的原理。
3. 已知MTI雷达波长为3cm，最大不模糊距离 $R_{\max}=50\text{km}$ ，若要测定速度小于700m/s的动目标，问有无测速模糊？若要克服速度模糊，采用双参差重复频率，问怎样设计重复频率？

- 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