

北京航空航天大学研究生院 《现代雷达系统理论》

第10讲：脉冲多普勒雷达与处理

北京航空航天大学 许小剑
2020年秋季学期

Xu: Radar Systems, Chapter-10

第九章 脉冲多普勒雷达与处理

9.1 MTI和PD雷达的概念

9.2 PD雷达工作原理

9.3 延时线对消器

9.4 数字MTI处理器

9.5 运动平台的MTI雷达

9.6 运动平台的PD雷达

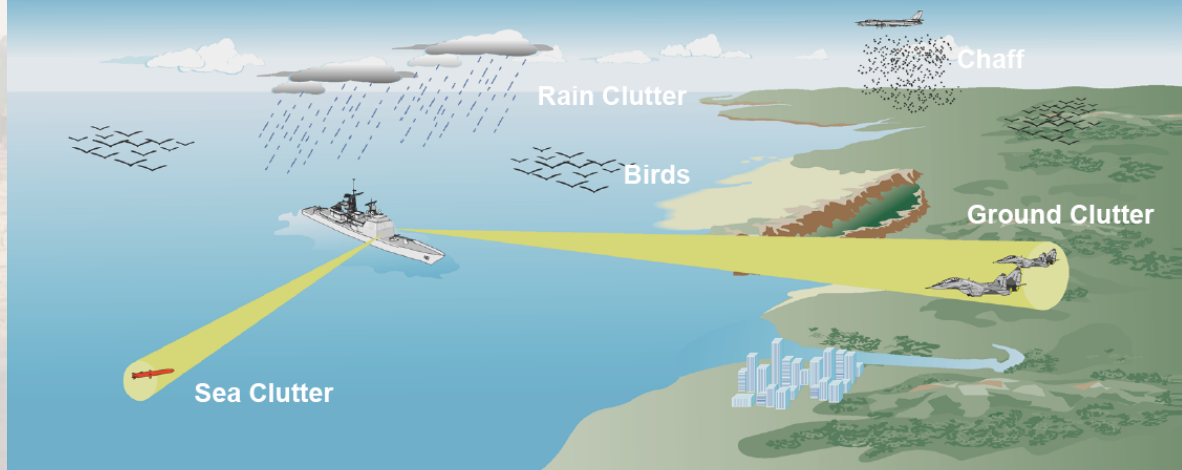
Xu: Radar Systems, Chapter-10

Why MTI & PD? — Clutter Rejection



Naval Air Defense Scenario

- Moving Target Indicator (MTI) and Pulse-Doppler (PD) processing use Doppler to reject clutter and enhance detection of moving targets
- Smaller targets require more clutter suppression



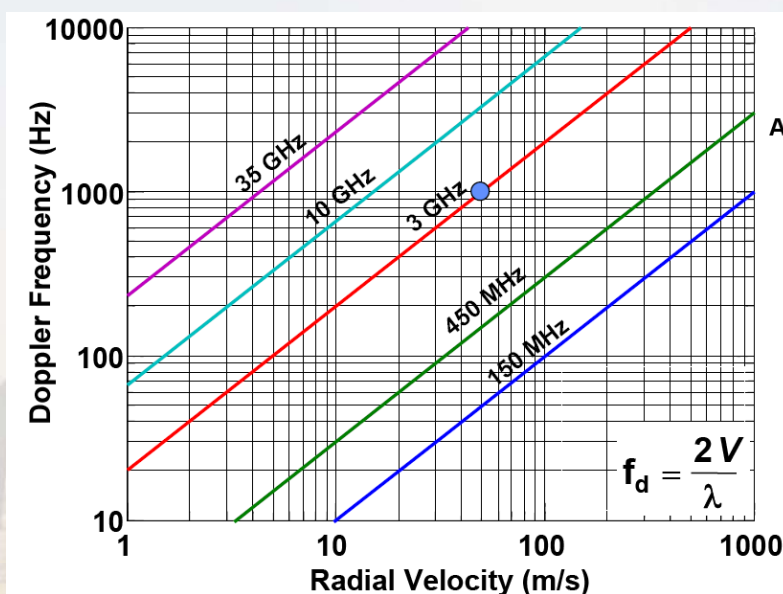
Xu: Radar

MTI_RadSys2001-6
JW 7/31/2008

MIT Lincoln Laboratory

3

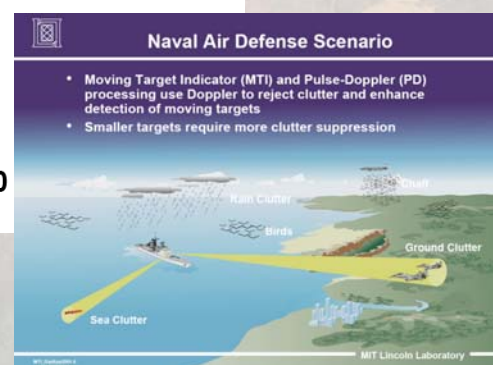
Clutter Rejection — How?



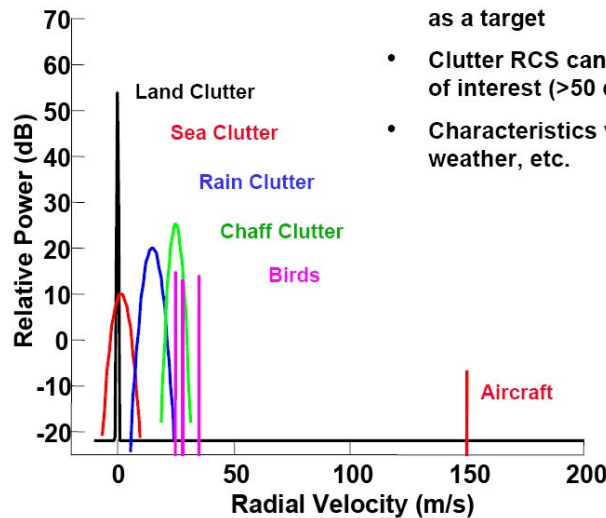
At S-Band (2800 MHz)

$f_d \sim 1 \text{ kHz} / 40 \text{ m/s}$

多普勒谱特性

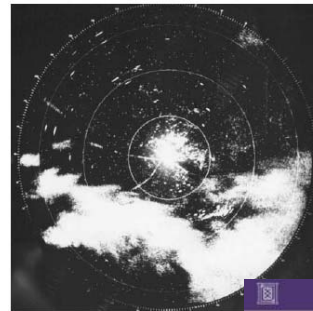


Clutter Rejection — How?



- Clutter comes from same range/angle cell as a target
- Clutter RCS can be much larger than targets of interest (>50 dB)
- Characteristics vary with terrain (land/sea), weather, etc.

PPI Display of Heavy Rain



利用目标与杂波之间多普勒谱特性的差异！



概念

动目标指示 (MTI) 和脉冲多普勒 (PD) 雷达都利用多普勒效应来检测运动目标。

Moving Target Indicator (MTI) Techniques

- Just separate moving targets from clutter
- Use short waveforms (two or three pulses)
- Do not provide target velocity estimation

Pulsed Doppler (PD) Techniques

- Separate targets into different velocity regimes in addition to canceling clutter
- Provide good estimates of target velocity
- Use long waveforms -- (many pulses, tens to thousands of pulses)

- MTI 雷达一般采用**较低的PRF**，以使它不会产生任何距离模糊，结果是其多普勒模糊严重（不测速）；
- PD 雷达则一般采用**较高的PRF**，以便使它不会产生多普勒模糊（测速），但存在距离模糊；
- 也存在这样一种情形（MTI或PD），即同时存在距离模糊和多普勒模糊。此时，需要通过其他技术来解模糊。

PD和MTI 雷达都通过目标与背景杂波多普勒谱的差异来检测目标、抑制杂波。因此，杂波的多普勒谱特性是影响PD和MTI 雷达性能的关键因素之一。

第九章 脉冲多普勒雷达与处理

9.1 MTI和PD雷达的概念

9.2 PD雷达工作原理

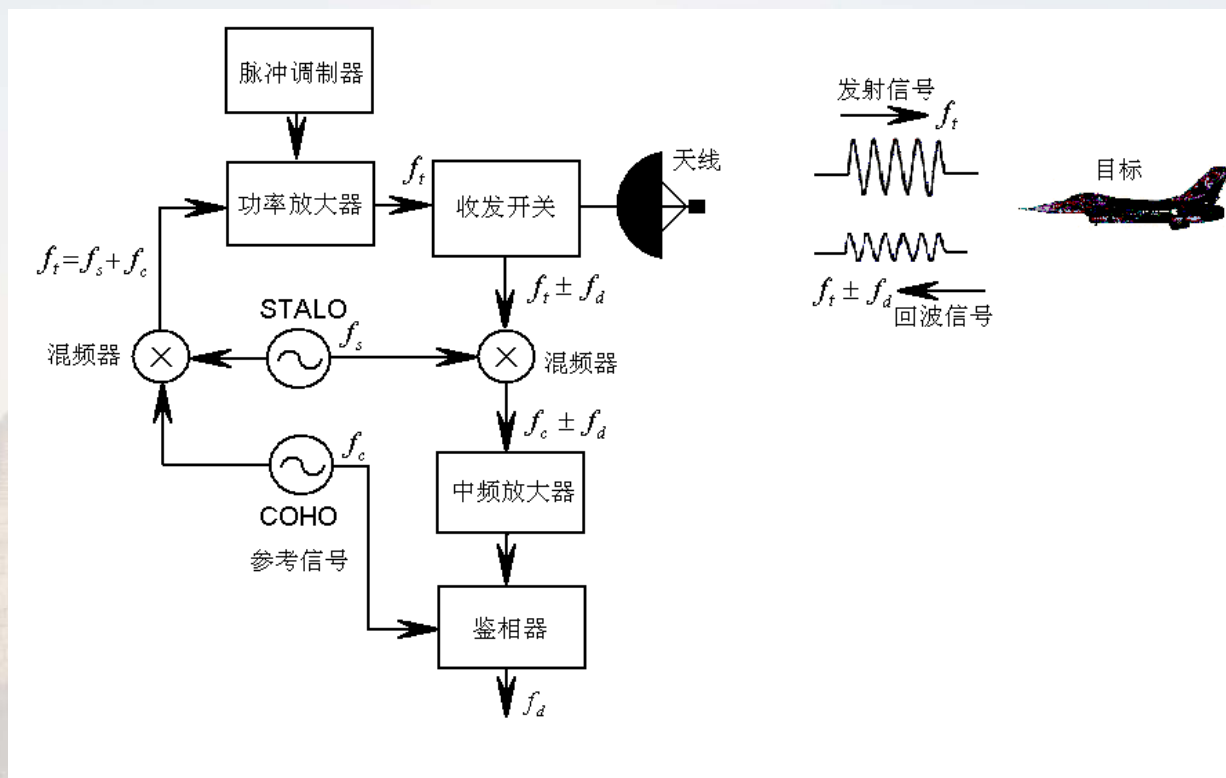
9.3 延时线对消器

9.4 数字MTI处理器

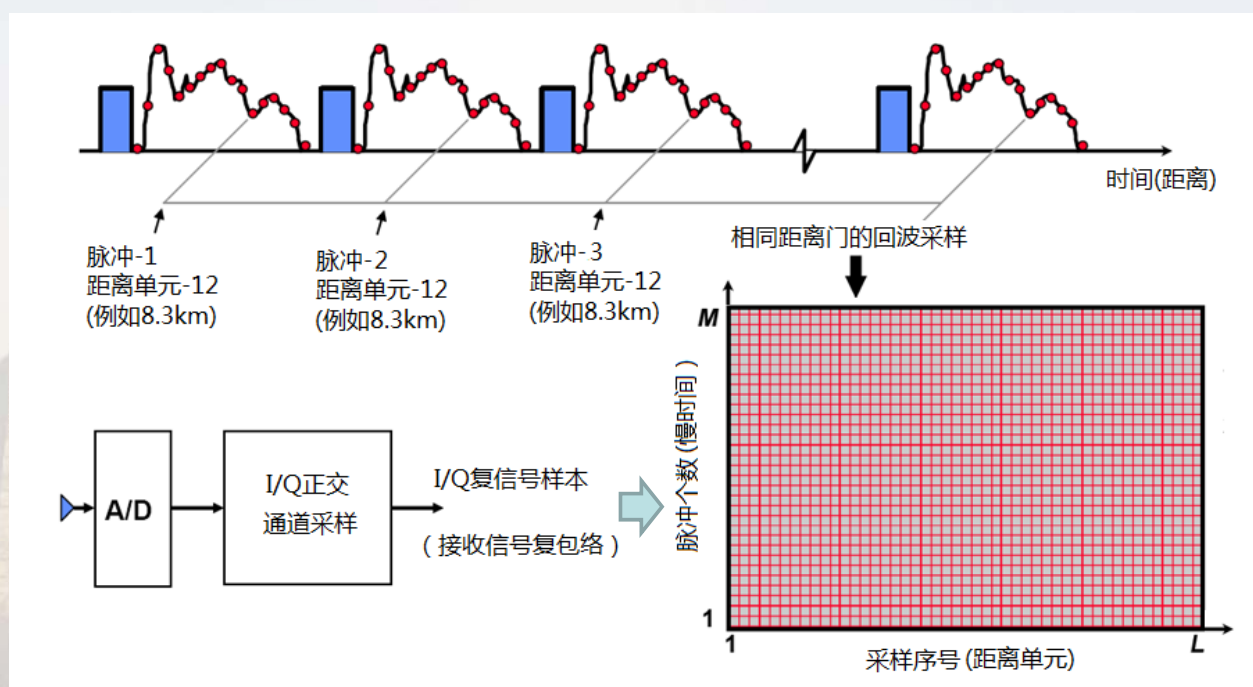
9.5 运动平台的MTI雷达

9.6 运动平台的PD雷达

PD雷达工作原理

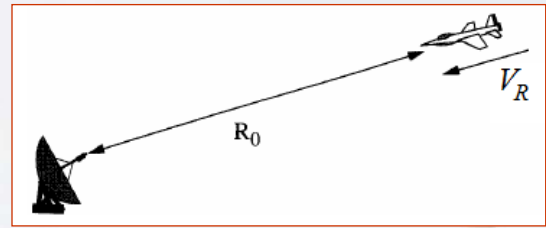


用于多普勒处理的雷达回波



假定雷达发射信号为

$$s_t(t) = A_t \sin(2\pi f_0 t)$$



距离 R_0 远处的目标有一个径向速度 V_R

则目标回波信号为

$$s_r(t) = A_r \sin[2\pi f_0 (t - T_R)]$$

$$T_R = \frac{2R}{c} = \frac{2R_0 - 2V_R t}{c}$$

接收信号可表示为

$$s_r(t) = A_r \sin\left[2\pi f_0 \left(1 + \frac{2V_R}{c}\right)t - \frac{4\pi f_0 R_0}{c}\right]$$

多普勒分量
固定时延

其频率同发射信号之间相差一个多普勒频率

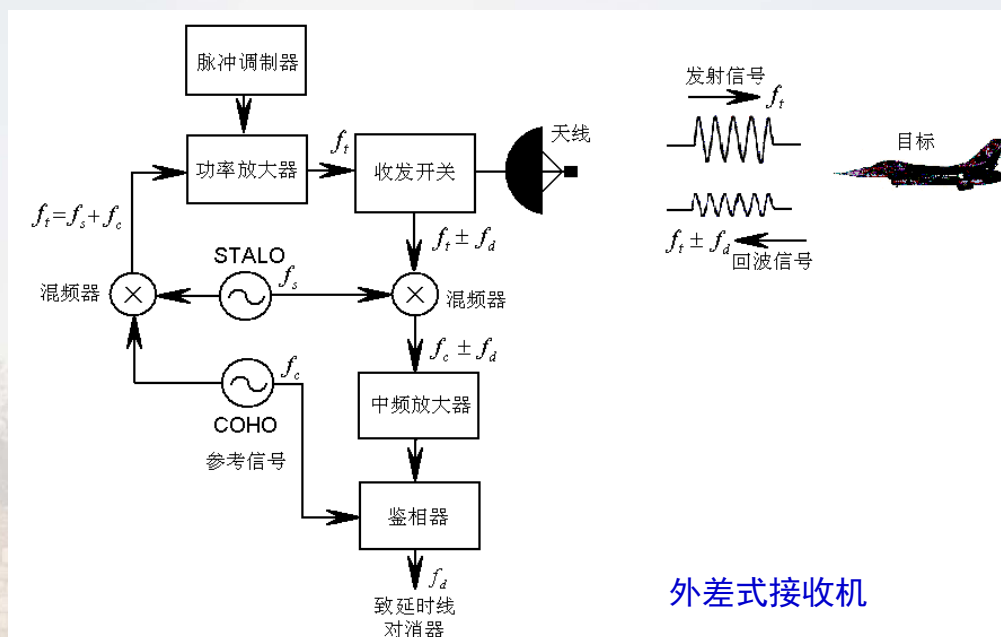
$$f_d = \frac{2f_0 V_R}{c} = \frac{2V_R}{\lambda}$$

当采用外差式接收机，用参考信号

$$s_{ref}(f) = A_{ref} \sin(2\pi f_0 t)$$

对该接收信号混频后，鉴相器输出的差频信号为

$$s_d(t) = A_d \cos\left(2\pi f_d t - \frac{4\pi R_0}{\lambda}\right)$$



$$s_d(t) = A_d \cos(2\pi f_d t - \frac{4\pi R_0}{\lambda})$$

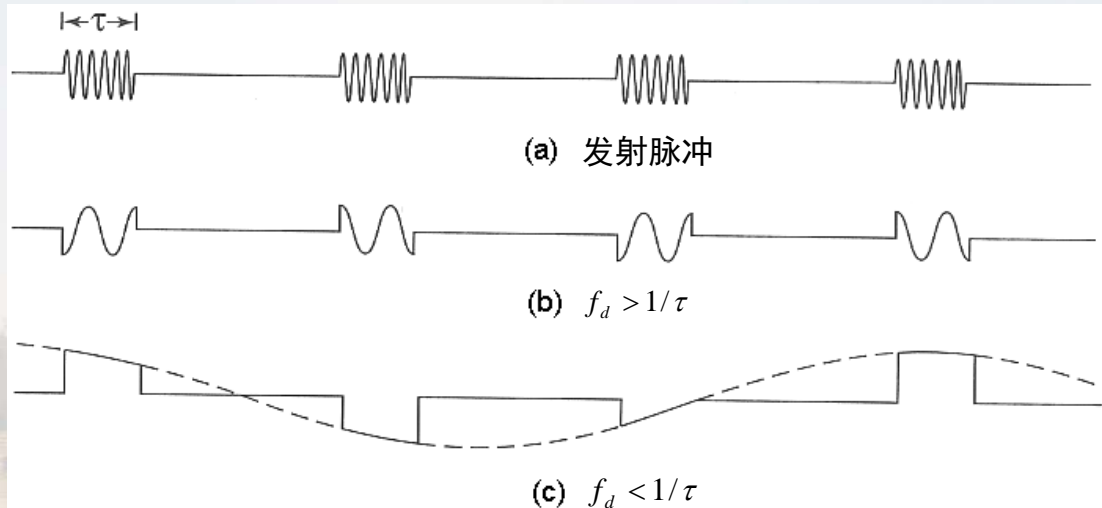
$$s_d(t) = A_d \cos(2\pi f_d t - \frac{4\pi R_0}{\lambda})$$

- 对于静止的点目标输出信号为常数， $f_d = 0$
- 对于固定位置上的分布式杂波，由于余弦函数的最大最小值取 ± 1 ，所以，不同距离上的回波可正可负，但给定距离上的输出回波不随时间变化；
- 对于运动的点目标，该信号为一随时间变化的函数，随时间变化快慢取决于目标的径向速度。

- 对于运动扩展目标？

$$s_d(t) = \sum_k A_{dk} \cos[2\pi f_{dk} t - \frac{4\pi}{\lambda} (R_0 + r_k)]$$

运动点目标的脉冲多普勒输出信号



无论是快速或慢速目标, 其回波强度均随时间起伏, 而静止目标的回波幅度是恒定的。**PD雷达**通过运动目标与静止目标/背景杂波的这种差异来检测目标、抑制背景杂波。

$$s_d(t) = A_d \cos(2\pi f_d t - \frac{4\pi R_0}{\lambda})$$

运动点目标的回波:

$$s_d(t) = A_d \cos(2\pi f_d t - \frac{4\pi R_0}{\lambda})$$

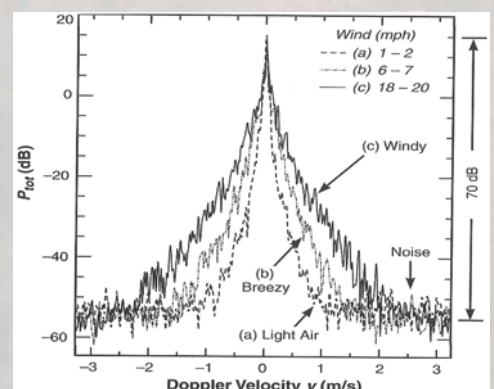
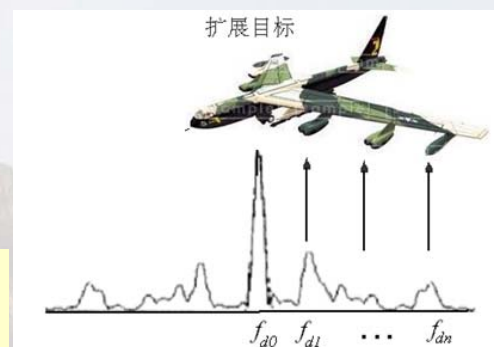
运动扩展目标的回波:

$$s_d(t) = \sum_k A_{dk} \cos[2\pi f_{dk} t - \frac{4\pi}{\lambda} (R_0 + r_k)]$$

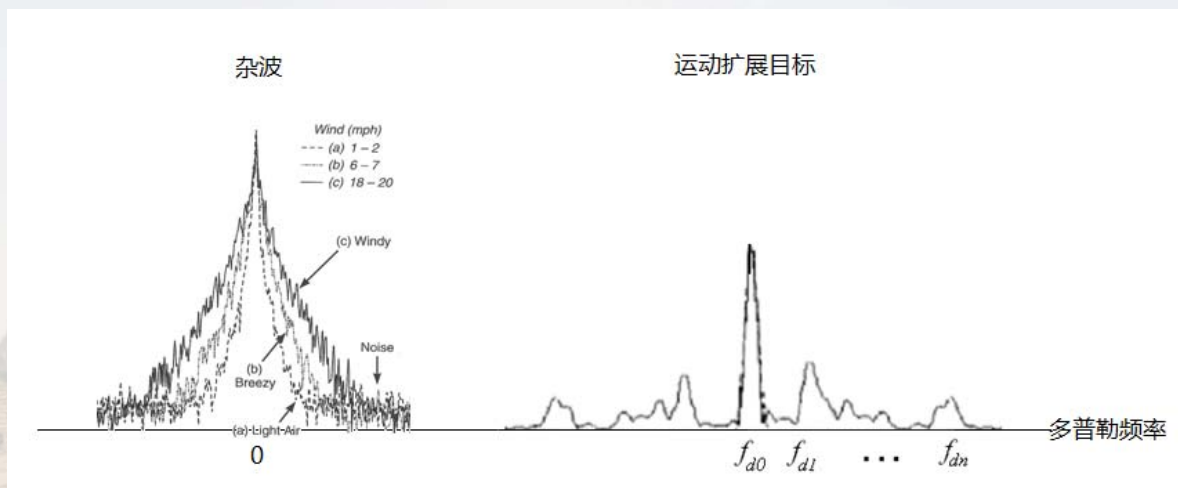
固定位置上分布式杂波:

中心多普勒频率为零, 但存在多普勒谱展宽。

多普勒频率特性



目标与杂波之间的（多普勒）可分性



可见，通过多普勒滤波有可能将运动目标从静止强杂波中分离（检测）出来，但其有效性既强烈地取决于杂波的多普勒谱分布特性，也取决于目标运动速度的快慢。

第九章 脉冲多普勒雷达与处理

9.1 MTI和PD雷达的概念

9.2 PD雷达工作原理

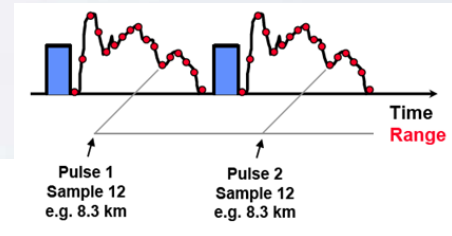
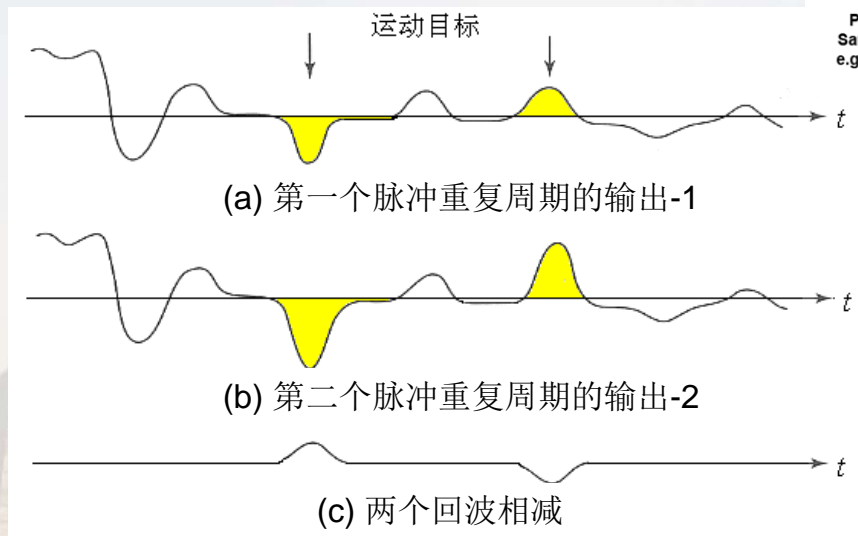
9.3 延时线对消器

9.4 数字MTI处理器

9.5 运动平台的MTI雷达

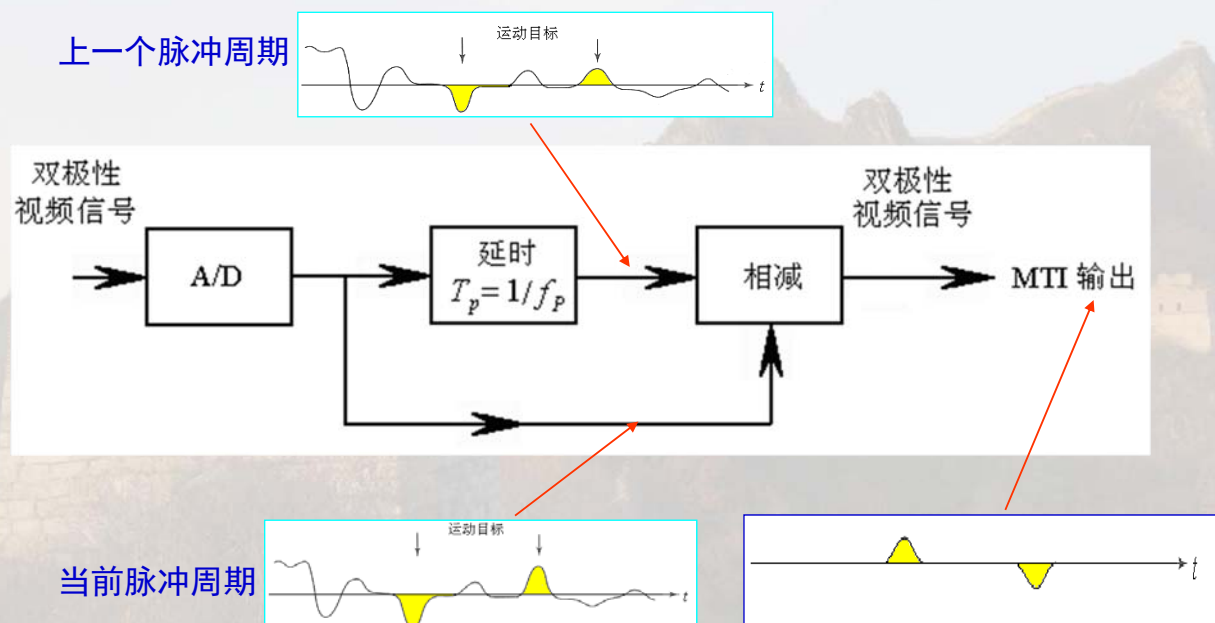
9.6 运动平台的PD雷达

杂波对消的概念

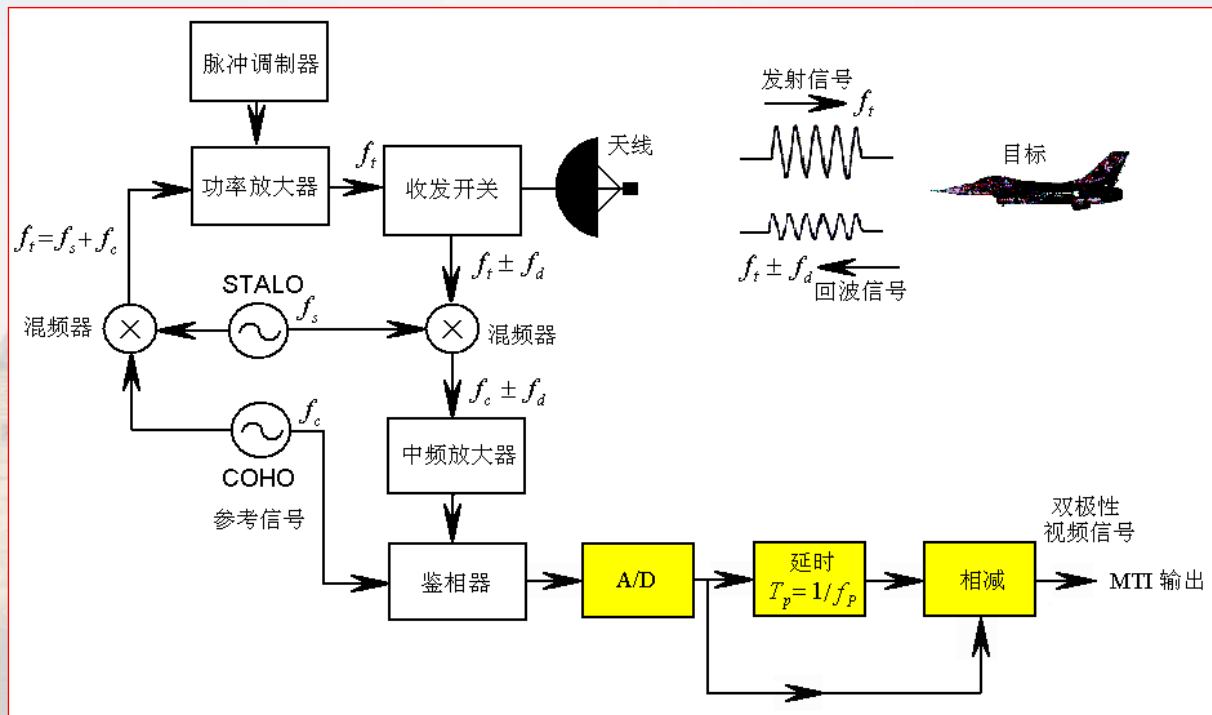


静止杂波的对消： (a) 运动目标和静止杂波的鉴相器输出-1；(b) 运动目标和静止杂波的鉴相器输出-2；(c) 两个信号相减，静止杂波因不随时间变化而被对消，只保留了运动目标的信号。

延时线对消器 (delay-line canceller)



单级延时线MTI对消雷达系统简化框图



单级延时线对消器的频率响应

在时间 t ，距离 R_0 远处的运动目标，鉴相器的输出信号为

$$s_1(t) = A \cos(2\pi f_d t - \phi_0)$$

对雷达下一个发射脉冲接收得到目标回波，其鉴相器输出信号与上述信号类似，只是相差一个脉冲重复周期 T_p

$$s_2(t) = A \cos[2\pi f_d (t - T_p) - \phi_0]$$

根据三角公式

$$\cos \alpha - \cos \beta = 2 \sin \frac{\beta - \alpha}{2} \sin \frac{\beta + \alpha}{2}$$

延时线对消器的输出可整理为

$$s(t) = s_2(t) - s_1(t) = 2A \sin(\pi f_d T_p) \cos[2\pi f_d (t - \frac{T_p}{2}) - \varphi_0 - \frac{\pi}{2}]$$

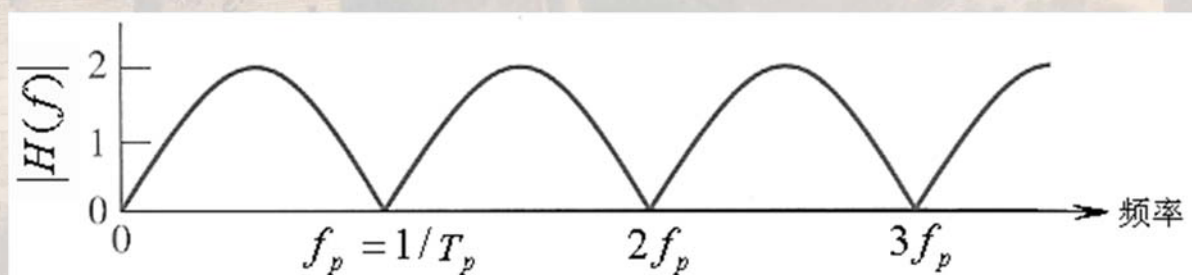
可见，延时线对消器的输出信号仍然为频率是 f_d 的余弦信号，但是有一个**附加的幅度调制**

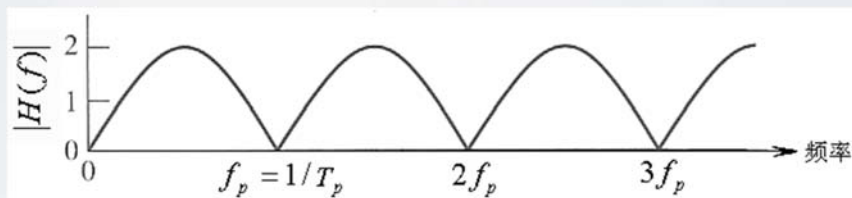
$$2 \sin(\pi f_d T_p)$$

对消器输出信号的幅度不但取决于输入信号幅度，而且还取决于目标多普勒频移 f_d 和雷达的脉冲重复周期 T_p

单级延时线对消器的频率响应为

$$H(f) = 2 \sin(\pi f T_p)$$

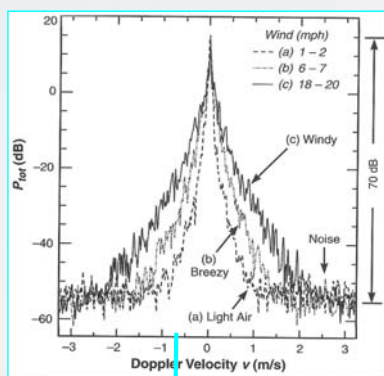




单级延时线对消器可以消除多普勒频率为零的杂波，但是，这种简单的多普勒滤波器同时还具有以下两个问题：

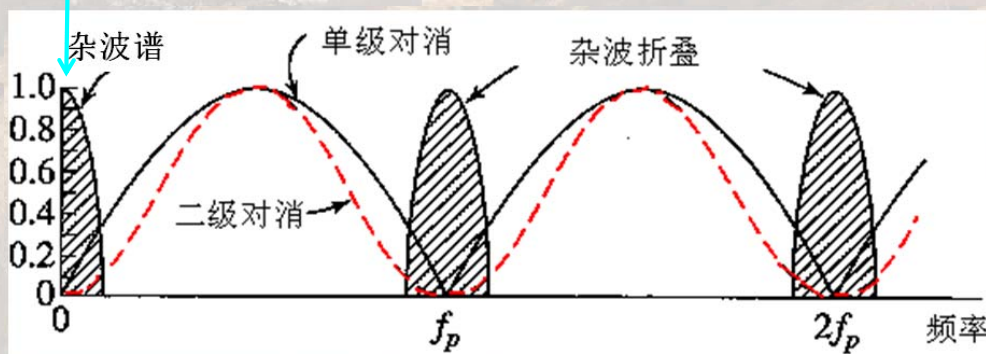
(1) 多普勒盲速：在雷达脉冲重复频率的整数倍处，滤波器的频率响应也为零，这意味着如果运动目标的多普勒频率是雷达脉冲重复频率的整数倍，则该目标的回波信号也会被对消掉，其结果是产生了多普勒盲速；

(2) 杂波泄漏：杂波的多普勒频谱一般不会是理想的 δ 函数，除了零多普勒以外的其它杂波分量会通过延时线对消器的通带，因而不可能被滤除干净。其结果是未被对消的杂波将对动目标检测产生干扰。

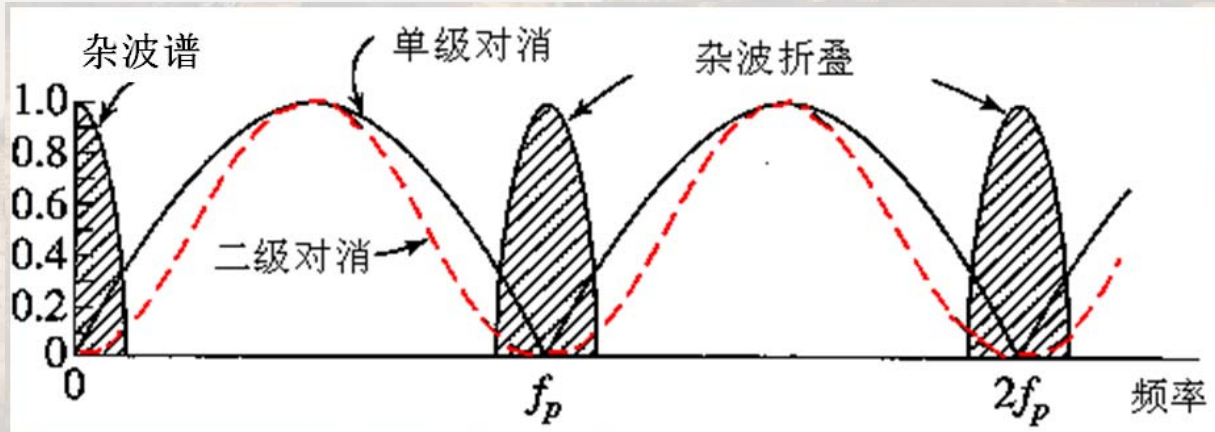


除了前述实际环境内部运动，实际的雷达系统，由于其STALO和COHO频率源也不可能是绝对稳定的。这两方面的原因，决定了雷达接收到的分布式杂波信号，其多普勒谱不可能是理想的冲击函数，而是有一定的谱宽度，如图中的阴影部分所示。

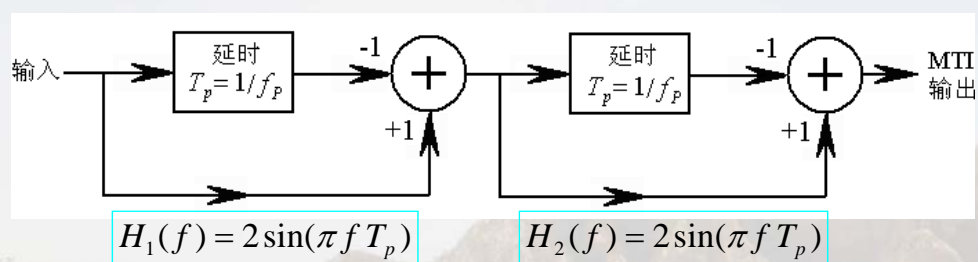
因此，实际雷达系统中杂波对消不可能是完美的。



从图中可以看到，由于杂波谱的展宽，单级延时线对消器（图中实线）的输出信号中会产生严重的杂波泄漏。杂波调制谱的 σ_c 越大，这种泄漏就越严重，因此将影响对强杂波中运动目标的检测。为减小杂波泄漏，可采用二级或多级延时线对消技术。

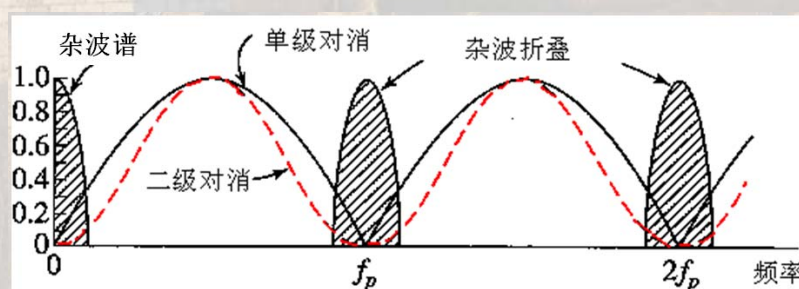


二级延时线对消器的频率响应



相当于两个单级延时线对消器级联：

$$H(f) = H_1(f)H_2(f) = 4 \sin^2(\pi f T_p)$$



杂波衰减因子

为了定量地描述杂波泄漏的影响，定义杂波衰减因子为

$$C_A = \frac{\int_0^\infty W(f) df}{\int_0^\infty W(f) |H(f)|^2 df} = \frac{C_{in}}{C_{out}}$$

杂波调制谱密度

输入杂波功率

输出杂波功率

延时线对消器的频响特性

对于高斯杂波谱和单级延时线对消器，有

$$C_A = \frac{\int_0^\infty W_0 \exp(-f^2 / 2\sigma_c^2) df}{\int_0^\infty W_0 \exp(-f^2 / 2\sigma_c^2) 4 \sin^2(\pi f T_p) df}$$

$$= \frac{1}{2[1 - \exp(-2\pi^2 T_p^2 \sigma_c^2)]}$$

$$e^{-x} \approx 1 - x$$

$$C_A \approx \frac{f_p^2}{4\pi^2 \sigma_c^2} = \frac{f_p^2 \lambda^2}{16\pi^2 \sigma_v^2}$$

对于大多数应用来说，单级对消器不足以满足动目标检测的要求。如果采用**二级延时线对消器**，由于其频率响应为

$$H(f) = 4 \sin^2(\pi f T_p)$$

此时的杂波衰减因子为

$$C_A \approx \frac{f_p^4}{16\pi^4 \sigma_c^4} = \frac{f_p^4 \lambda^4}{256\pi^4 \sigma_v^4}$$

比较：单级延时线

$$C_A \approx \frac{f_p^2}{4\pi^2 \sigma_c^2} = \frac{f_p^2 \lambda^2}{16\pi^2 \sigma_v^2}$$

MTI 改善因子

MTI改善因子，它定义为输出信号杂波比（信杂比，SCR）同输入信号杂波比之比，即

$$I_f = \frac{(S/C)_{out}}{(S/C)_{in}} = \frac{C_{in}}{C_{out}} \frac{S_{out}}{S_{in}}$$

MTI改善因子同杂波衰减因子之间的关系是

$$I_f = C_A G$$

式中 G 为对信号的平均增益，它同杂波衰减因子相比一般较小。

（**MTI改善因子**=杂波衰减因子×信号增益，相当于**信杂比改善倍数**）

杂波中的可见度 (SCV)

杂波中可见度 (Subclutter visibility, SCV) 定义为MTI改善因子同所要求的最小输出信杂比之间的比值, 即

$$SCV = \frac{I_f}{(S/C)_{\min}}$$

对于给定的最小输出信杂比要求, SCV同 I_f 具有相同的意义。

典型MTI处理的杂波改善因子

单级延时线MTI:

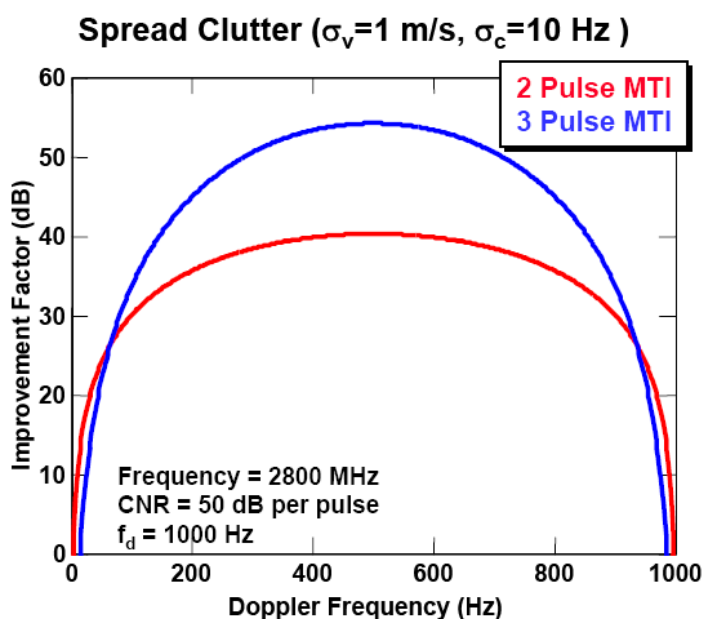
2-Pulse MTI

$$V_{\text{output}} = V_i - V_{i-1}$$

两级延时线MTI:

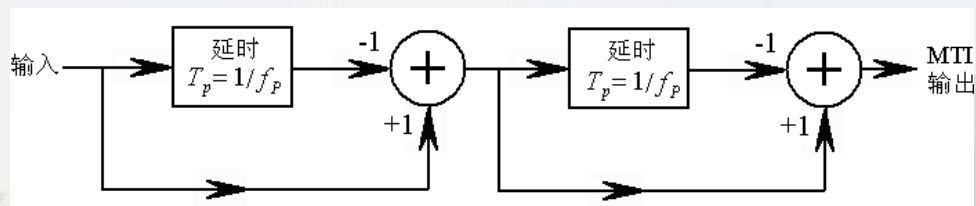
3-Pulse MTI

$$V_{\text{output}} = V_i - 2V_{i-1} + V_{i-2}$$

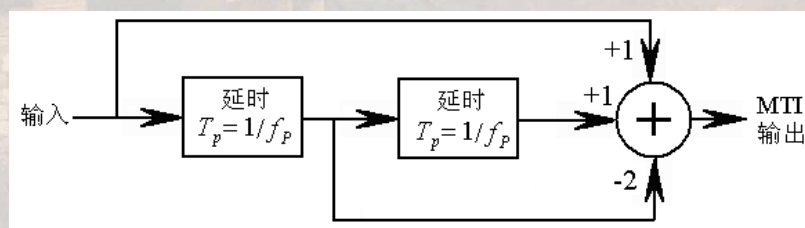


多脉冲延时线对消器

二级延时线对消器：

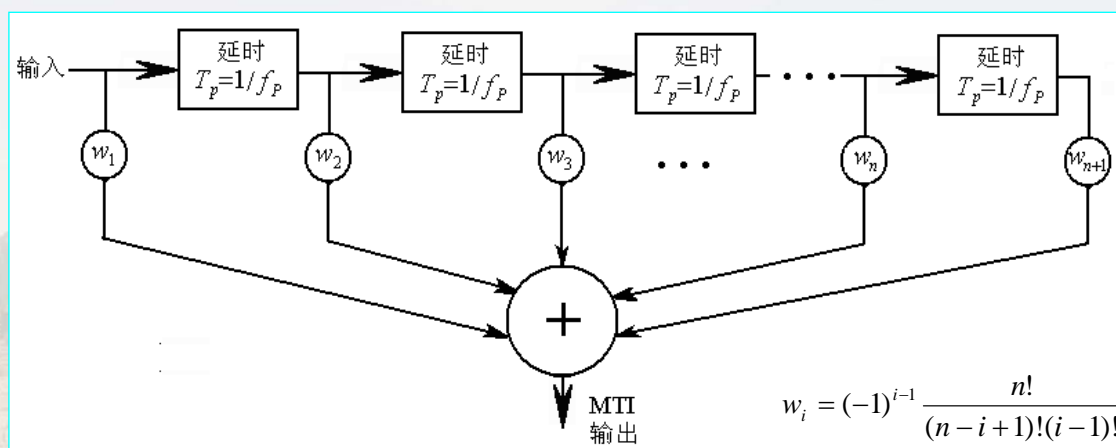


相当于3脉冲对消器：



它与二级延时线对消器具有相同频率响应，使用了3个脉冲。

n-脉冲对消器：具有一般横向滤波器的结构



频率响应：

$$2^{n-1} \sin^{n-1}(\pi f T_p) \quad (\text{理论上} n \text{ 越大, 杂波衰减效果越好})$$

第九章 脉冲多普勒雷达与处理

9.1 MTI和PD雷达的概念

9.2 PD雷达工作原理

9.3 延时线对消器

9.4 数字MTI处理器

9.5 运动平台的MTI雷达

9.6 运动平台的PD雷达

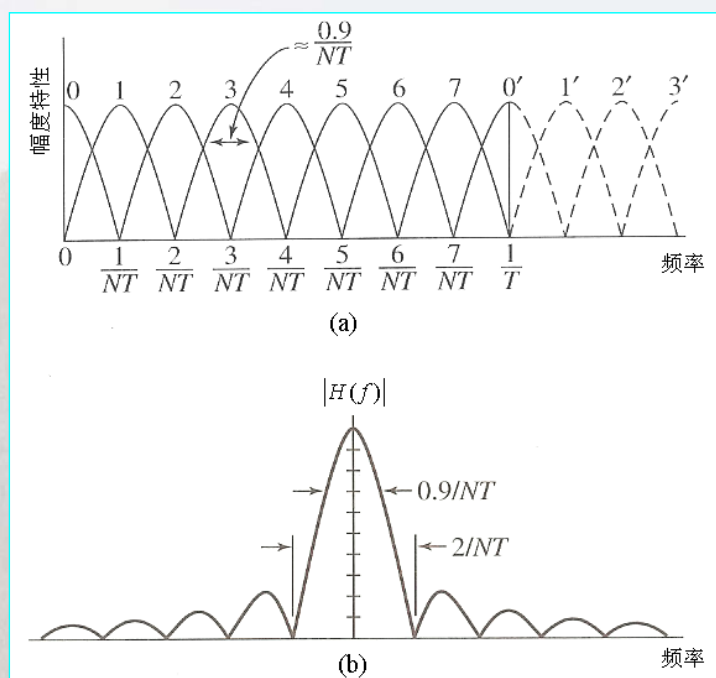
多普勒滤波器组

在MTI雷达系统中，可采用由 N 个多普勒滤波器组成的滤波器组。

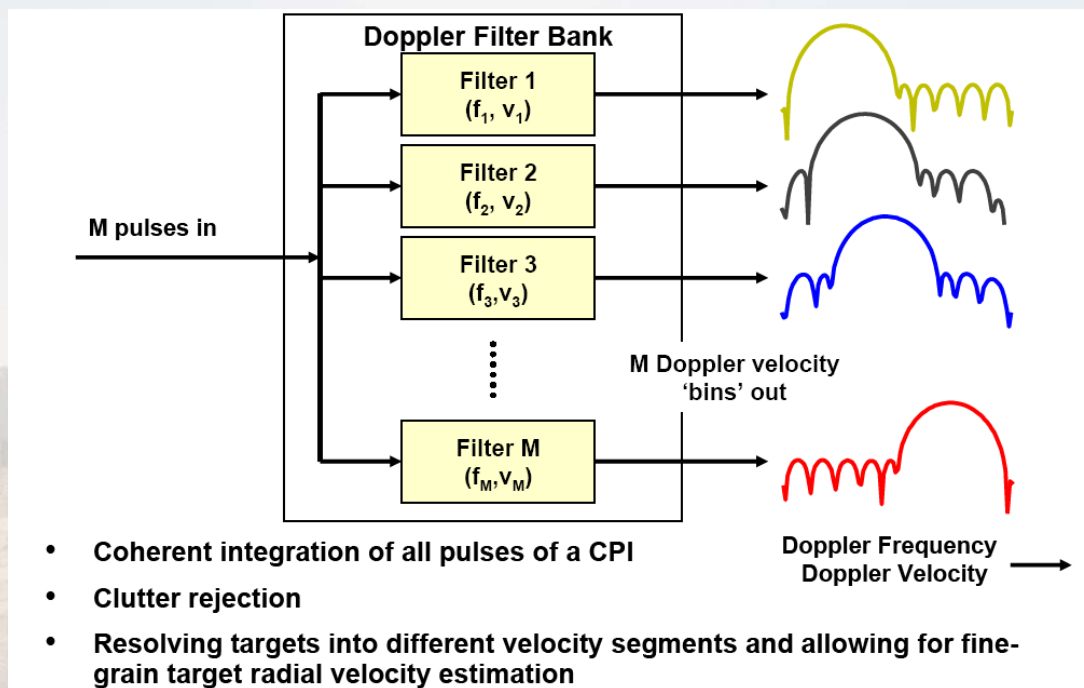
滤波器组幅频特性

$$N = 8$$

单个滤波器的幅频特性



多普勒滤波器组



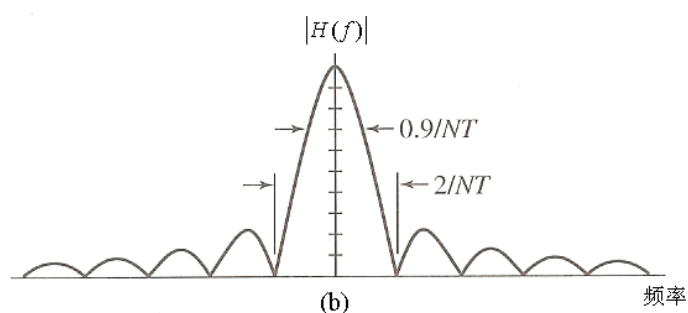
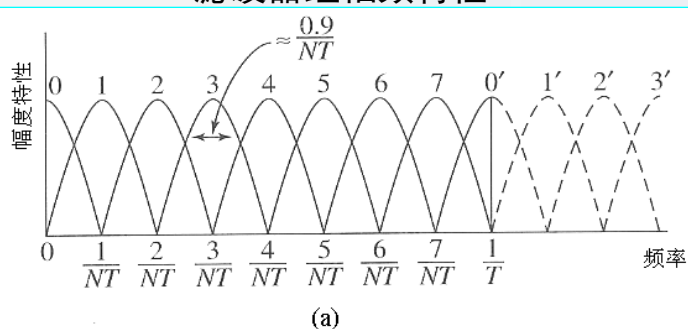
- ❑ 所谓的MTI “不测速” 并不是绝对的！
- ❑ 多普勒滤波器组可通过数字信号处理(FFT) 来实现。

多普勒滤波器组的数字实现

$$N = 8$$

- 同数字滤波器的关系
- 同快速傅里叶变换的关系

滤波器组幅频特性



单个滤波器的幅频特性

第九章 脉冲多普勒雷达与处理

9.1 MTI和PD雷达的概念

9.2 PD雷达工作原理

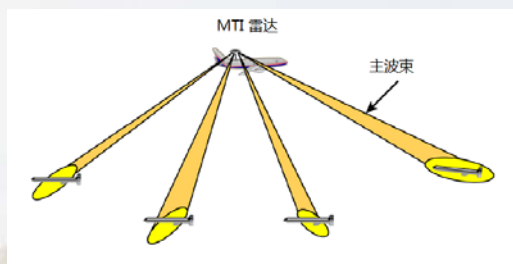
9.3 延时线对消器

9.4 数字MTI处理器

9.5 运动平台的MTI雷达

9.6 运动平台的PD雷达

运动平台的MTI雷达



运动平台造成的主要影响：

非零多普勒：当雷达安装在一个运动平台（例如舰船、飞机、航天飞机、卫星等）上时，杂波的多普勒频移将不再为零。杂波的多普勒频移取决于杂波单元同运动平台之间的相对速度，因此，将随着雷达平台的速度、杂波单元相对于雷达的方位和俯仰角等而变化。

杂波谱的展宽：由于雷达天线的波束有一定宽度而造成，因为当雷达波束有一定宽度时，来自于不同雷达分辨单元的杂波具有不同的多普勒频率。

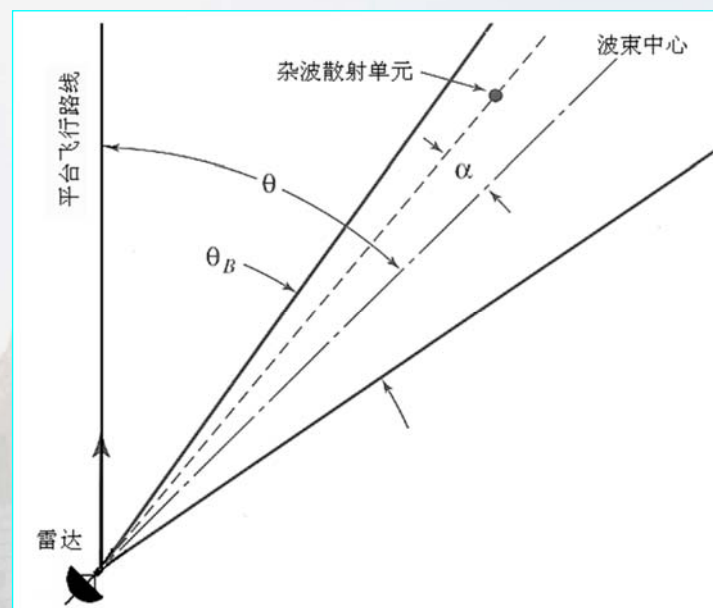
非零多普勒和多普勒频谱展宽这两者均会对MTI性能造成严重影响，需要采用不同的技术加以补偿：

- 非零多普勒：一般采用所谓的时间平均杂波相参机载雷达（TACCAR）
- 多普勒展宽：采用所谓的偏置相位中心天线（DPCA）技术。

时间平均杂波相参机载雷达（TACCAR）

波束中心：

$$f_c = \frac{2V \cos \theta}{\lambda}$$



可以根据这些杂波回波信号本身的多普勒来设定COHO的频率，从而补偿杂波的多普勒中心频率，使得多普勒滤波器的凹口能对准杂波多普勒使其得到衰减，这种技术早期称为杂波锁定的MTI，现在一般称为时间平均杂波相参机载雷达（TACCAR）。

杂波多普勒展宽的补偿

非波束中心:

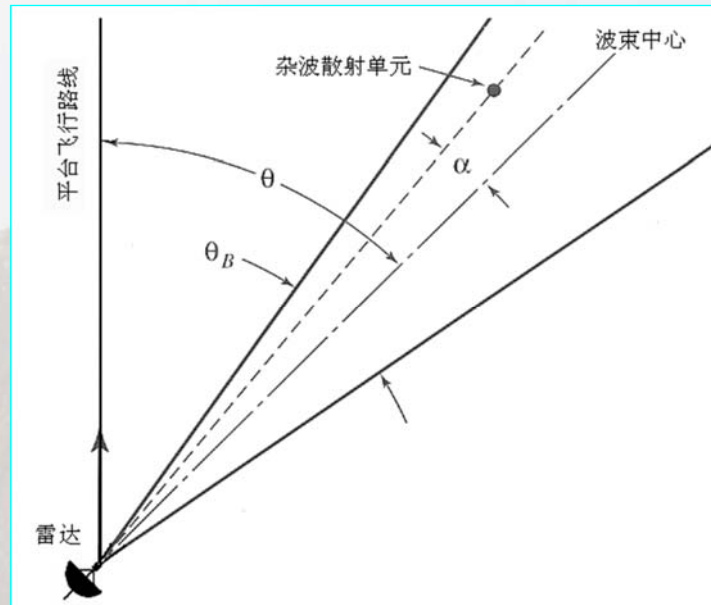
$$f_c \neq \frac{2V \cos \theta}{\lambda}$$

$$\Delta \theta_{\max} = \theta_B$$

$$\frac{\Delta f_c}{\Delta \theta} = \frac{2V \sin \theta}{\lambda}$$

$$\Delta f_{c \max} = \frac{2V}{\lambda} \theta_B \sin \theta$$

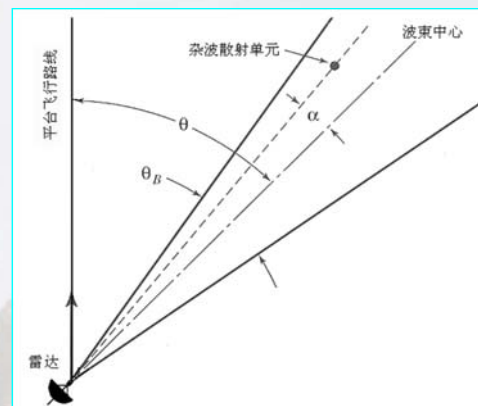
会产生一个附加的多普勒频率偏移, TACCAR 技术不能将这个频率偏移补偿掉。



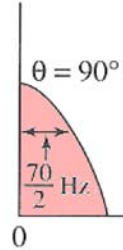
$$f_c = \frac{2V \cos \theta}{\lambda}$$

$$\Delta f_{c \max} = \frac{2V}{\lambda} \theta_B \sin \theta$$

(仅0° 指向时不展宽)



正侧视



theta = 60°

60

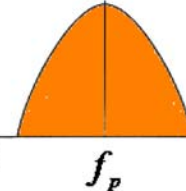
theta = 30°

35

正前视

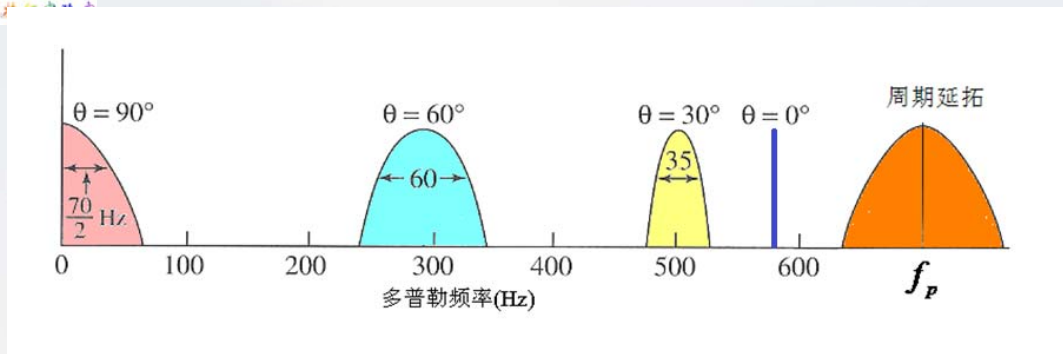
theta = 0°

周期延拓

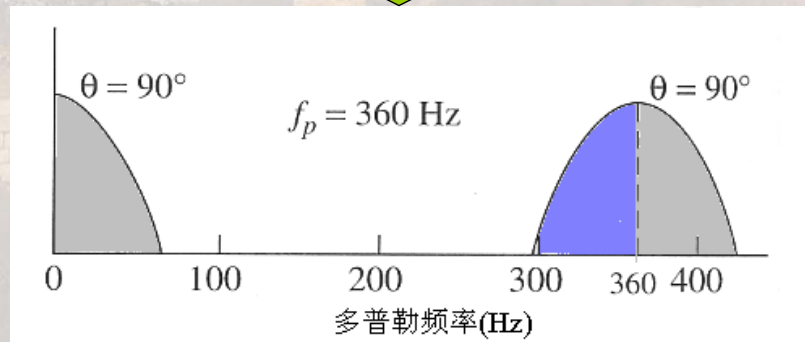


多普勒频率(Hz)

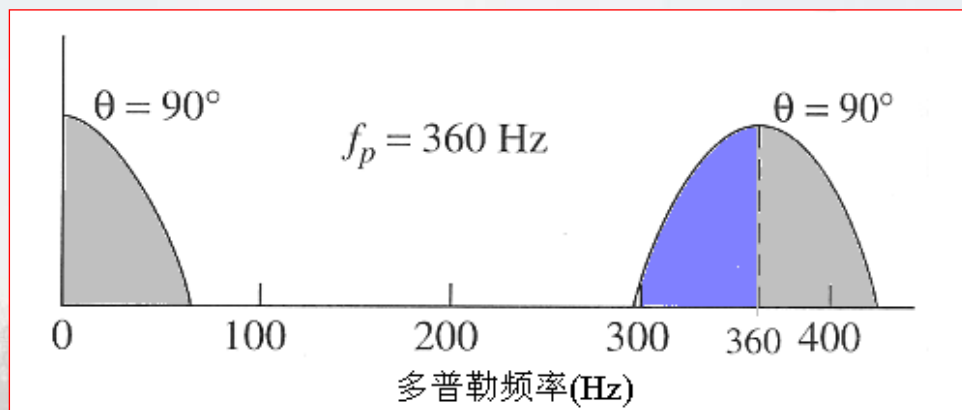
雷达PRF很高时无频谱折叠, 否则出现折叠。在本例中, 无频谱折叠要求 $f_p > 600 \text{ Hz}$



若PRF较低



雷达PRF低时产生频谱折叠

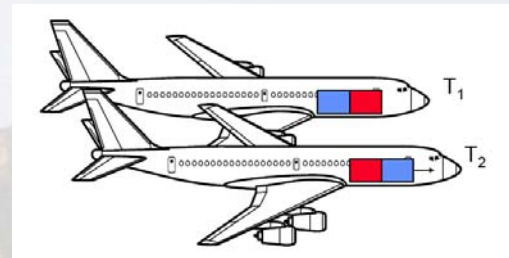


MTI雷达多工作在低PRF情况。

可见，当雷达平台运动时，其杂波多普勒频谱占据了较大的频谱空间。为了使MTI处理有效，必须压缩杂波多普勒的频谱展宽。

压缩杂波多普勒的频谱展宽的方法：

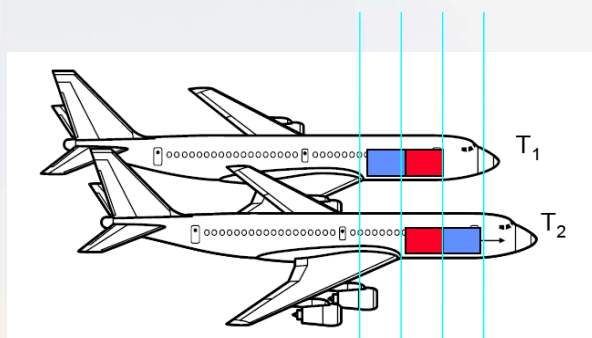
在雷达平台运动时，如果我们在作MTI处理中能**让雷达天线看起来仍是静止的**，则上述杂波多普勒频谱展宽将不复存在。用两个相同的天线可以做到这一点，即：



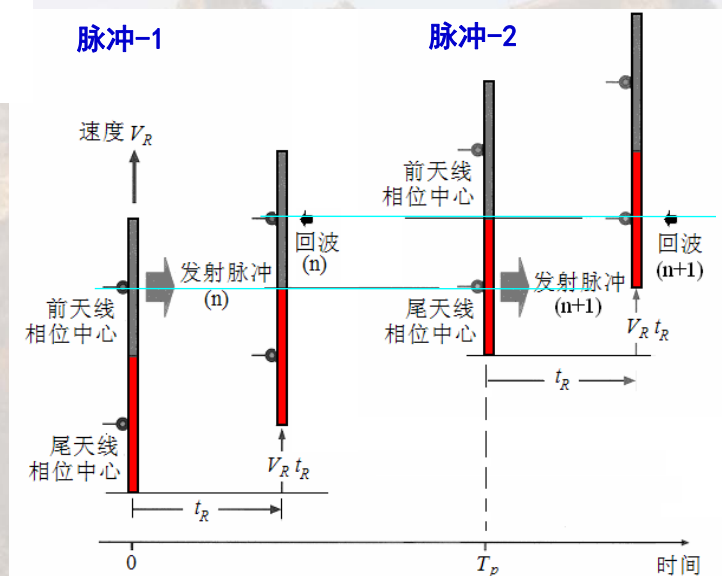
如果雷达平台**上一前一后安装两副正侧视天线**，两副天线的相位中心沿平台速度方向相距为 VT_p ， V 为平台速度， T_p 为脉冲重复间隔。

若前一个天线发射并接收第一个脉冲信号，当平台移动使得后一个天线**正好**到达前一天线收发信号时的相同位置时，该天线发射一个脉冲并接收回波信号。这样，**两副天线在同一位置各发射了一个脉冲并接收回波信号**。

对于雷达而言，**可以看成是不同时刻由一个静止的天线发射了两个脉冲并接收两个回波信号**。可见，这样的两个多普勒回波信号可以用延时线对消器进行处理而不会受到平台运动的影响！



双天线工作、平台速度与天线位置同步的思路：一个天线的收发位置正好位于另一个天线上上次收发的位置



问题：

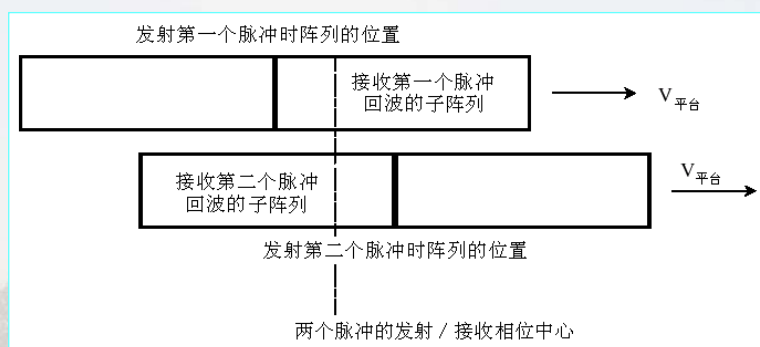
- (1) 雷达的PRF必须同载机速度完全同步；
- (2) 如果天线要在方位向扫描，则这两个天线之间的距离随方位角的余弦而变化。

解决办法：偏置相位中心天线（DPCA）

方法一：采用机械旋转的天线，产生两个重叠的斜视波束。对这两个波束的输出信号进行适当的组合，可以实现DCPA。

方法二：采用单个侧视相控阵天线。当处理第一个脉冲时，使用其中的一部分阵列，而处理第二个脉冲时，使用另外一部分阵列，其中两者之间会有部分阵列相重叠。这样，对于第一个脉冲，天线的相位中心会比实际相位中心超前一些，而对于第二个脉冲，则天线的相位中心会比实际相位中心落后相同的量。

偏置相位中心天线（DPCA）技术



当处理**第一个脉冲**时，使用其中的一部分阵列，而处理第二个脉冲时，使用另外一部分阵列，其中两者之间会有部分阵列相重叠。这样，对于第一个脉冲，天线的相位中心会比实际相位中心**超前**一些，而对于**第二个脉冲**，则天线的相位中心会比实际相位中心**滞后**相同的量。

第九章 脉冲多普勒雷达与处理

9.1 MTI和PD雷达的概念

9.2 PD雷达工作原理

9.3 延时线对消器

9.4 数字MTI处理器

9.5 运动平台的MTI雷达

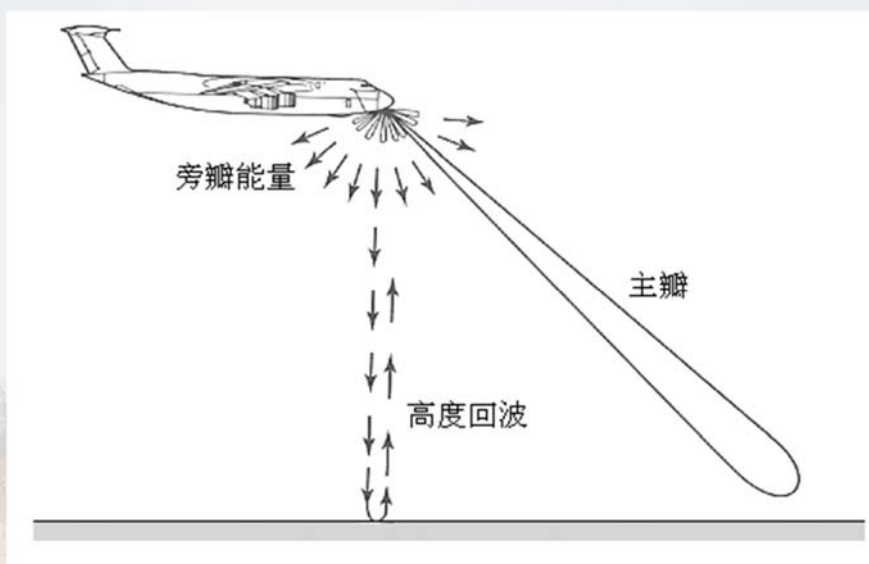
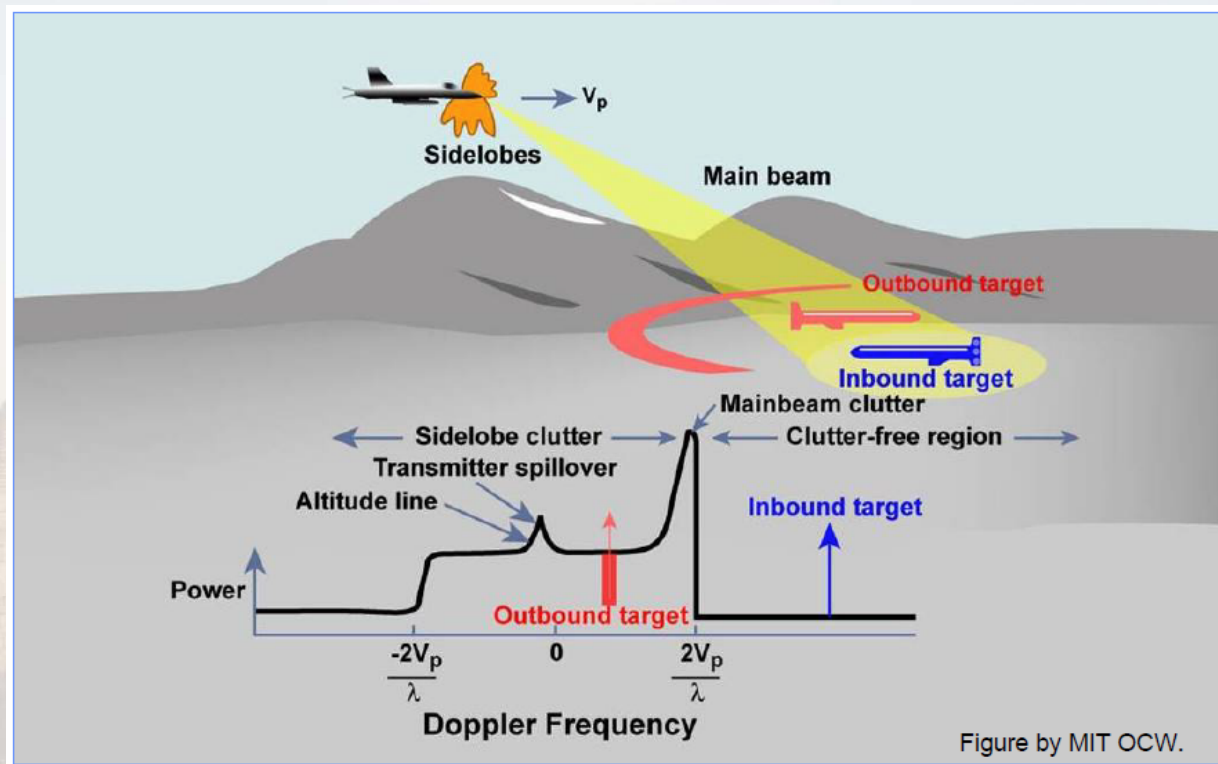
9.6 运动平台的PD雷达

运动平台的脉冲多普勒雷达

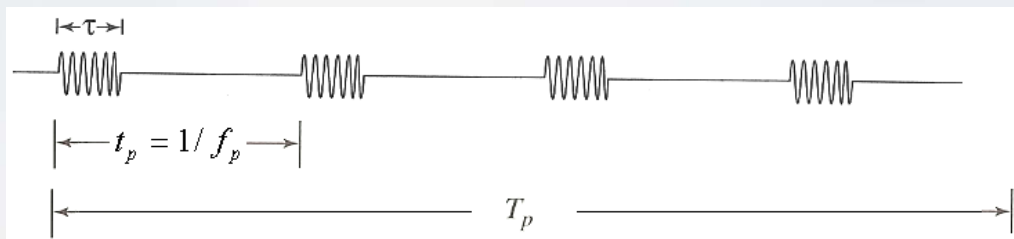
在MTI雷达中，一般选择较低的PRF以便没有距离模糊，但是通常会有大量的多普勒模糊（盲速）。在频率较低时，这种盲速的影响一般可以容忍，因此MTI是一种从杂波中检测运动目标的好方法。

随着雷达频率的提高，盲速问题将变得越来越突出。这是因为如果频率增大，而PRF保持不变，则第一盲速区将缩小，而且盲速出现的次数将增加。对于工作在微波频段得的机载雷达，这种盲速导致的性能下降变得不可容忍，使得这类机载雷达不得不采用高PRF，实际上是通过牺牲距离不模糊来换取较大的多普勒空间。这类雷达称为脉冲多普勒雷达，一般可分为高重（复频率）和中重（复频率）两种。

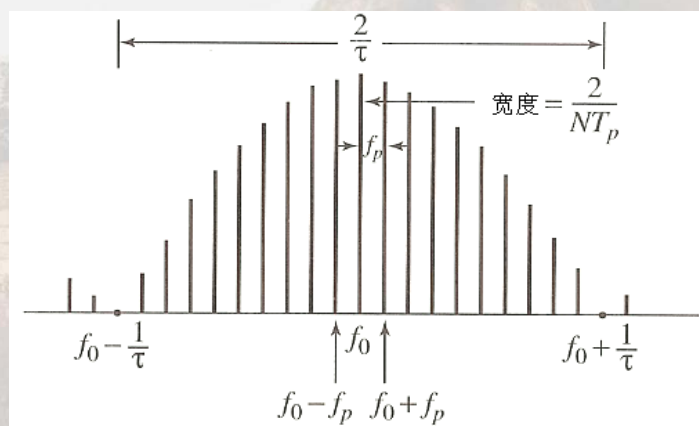
运动平台PD雷达工作场景



典型机载PD雷达的工作状态：天线主波束照射目标区，天线旁瓣在很大入射角范围内对地面照射，从而产生旁瓣杂波和高度回波。

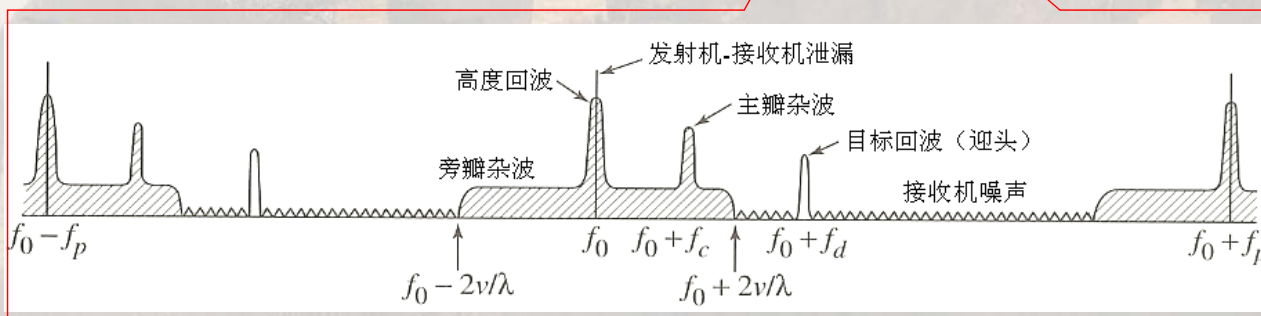
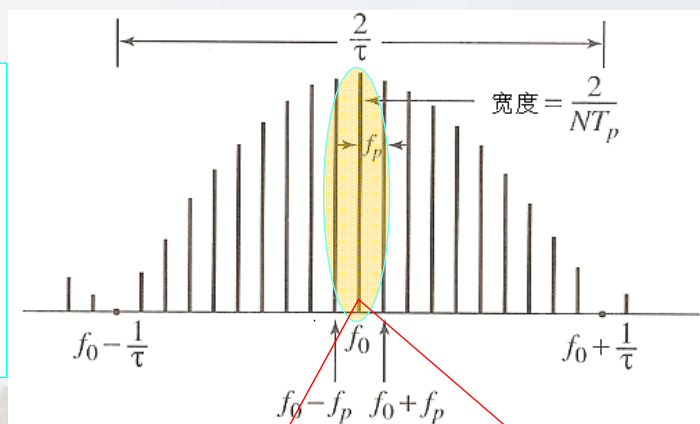
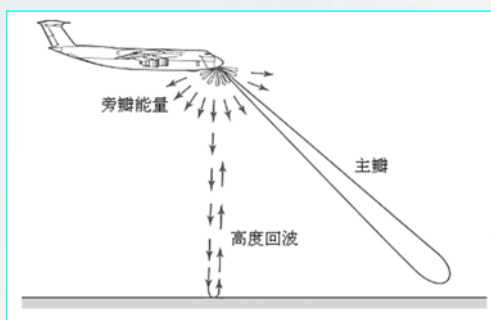


发射脉冲串



对应的频谱

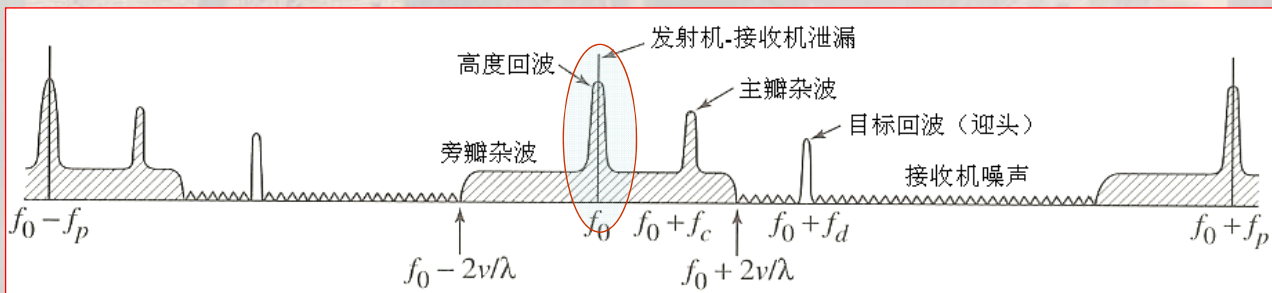
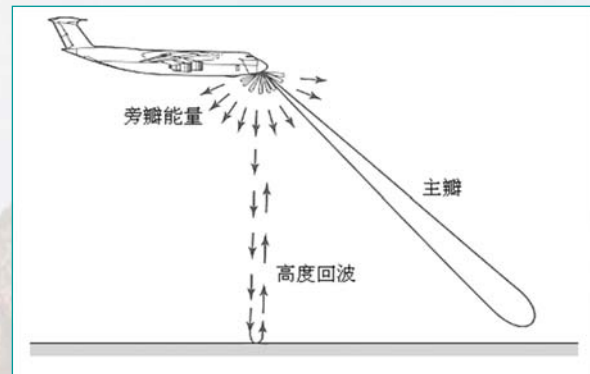
发射N个脉冲串的频谱



接收信号在载频附近的频谱分量

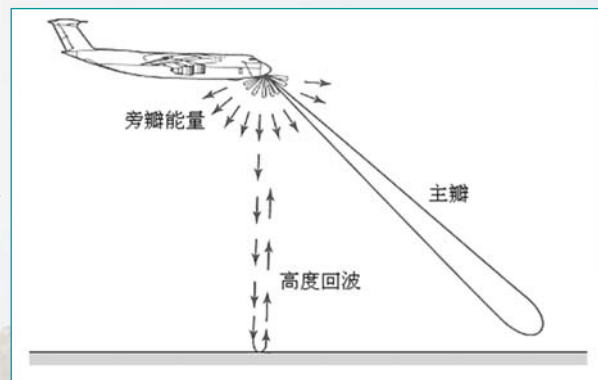
高度回波：

在载频频率附近，会有一个很大的回波，它直接来自于雷达的下方，称为高度回波。这一回波没有多普勒频移，因为其相对径向速度为零。由于多普勒折叠的影响，该回波在 $f_0 \pm nf_p$ 处重复出现。此外，该信号分量中也可能存在雷达发射机泄漏的影响。上述回波可以通过设置在 处的凹口滤波器予以消除。

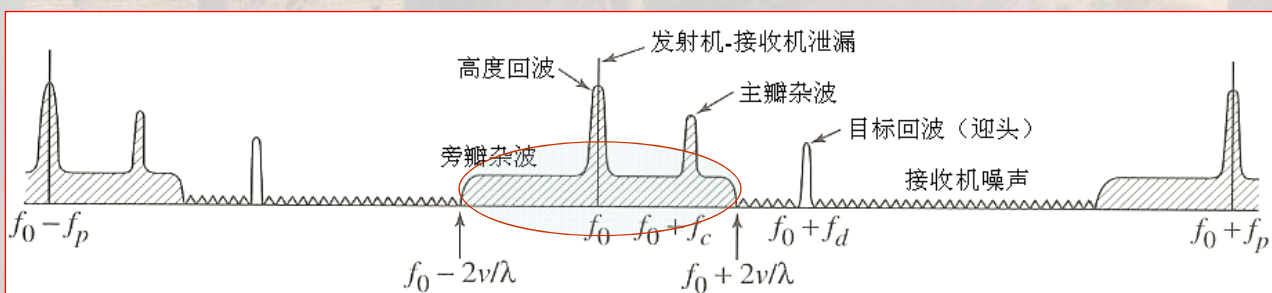


旁瓣杂波：

天线的旁瓣会在一个很大的入射角范围内（从0°到几乎接近90°）对环境照射，因此如果雷达的绝对速度为 v ，则这种旁瓣杂波的多普勒将以 f_0 为中心向 $\pm \frac{2v}{\lambda}$ 两端扩展。

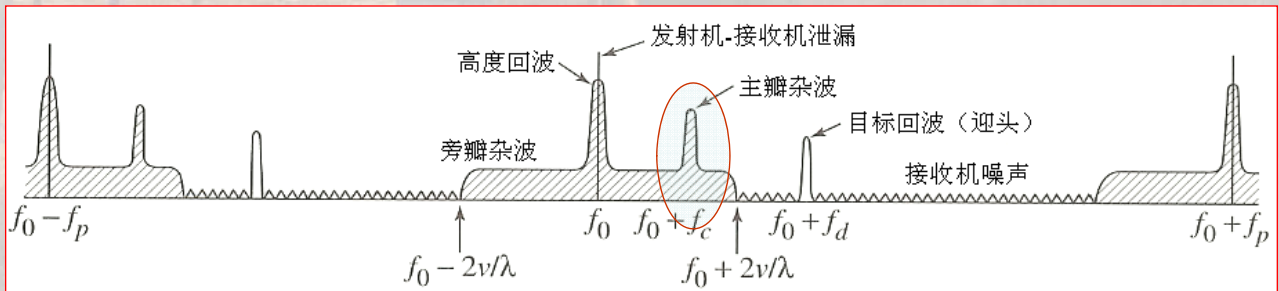
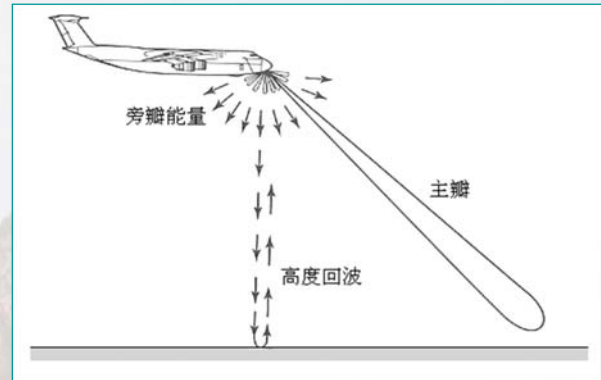


在高重PD雷达中，因为存在大量距离模糊混叠，天线旁瓣杂波一般很强。Why?



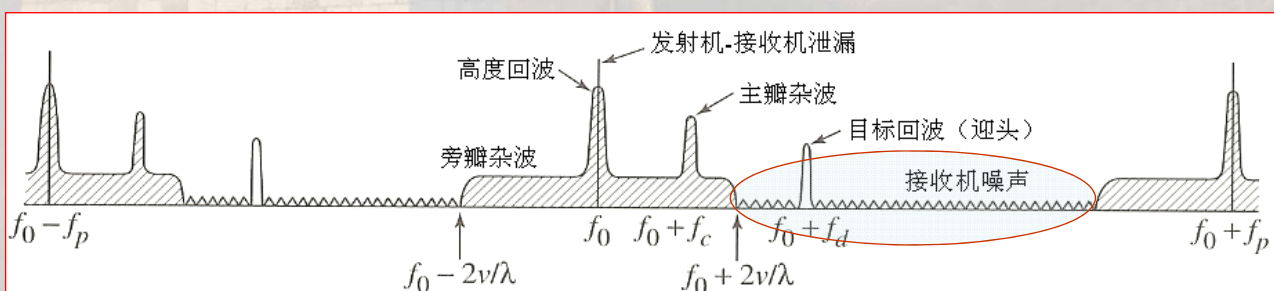
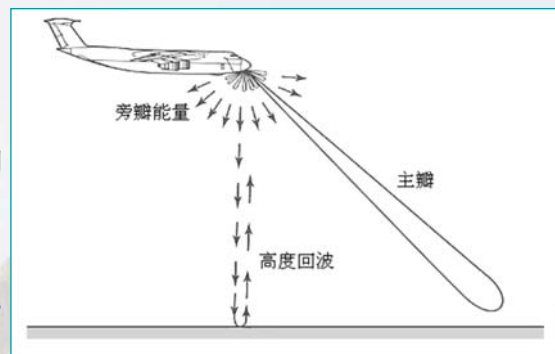
主瓣杂波:

天线主波束的杂波幅度相对较大，它位于旁瓣杂波区域内的某个位置。如果天线波束进行扫描，则主瓣杂波的多普勒频率将发生变化，因此其位置也在改变。主瓣杂波可以通过跟踪该多普勒频率的调谐滤波器来予以消除。同AMTI一样，平台的运动会影响主瓣杂波的谱宽，但在高重PD雷达中这通常不成问题。

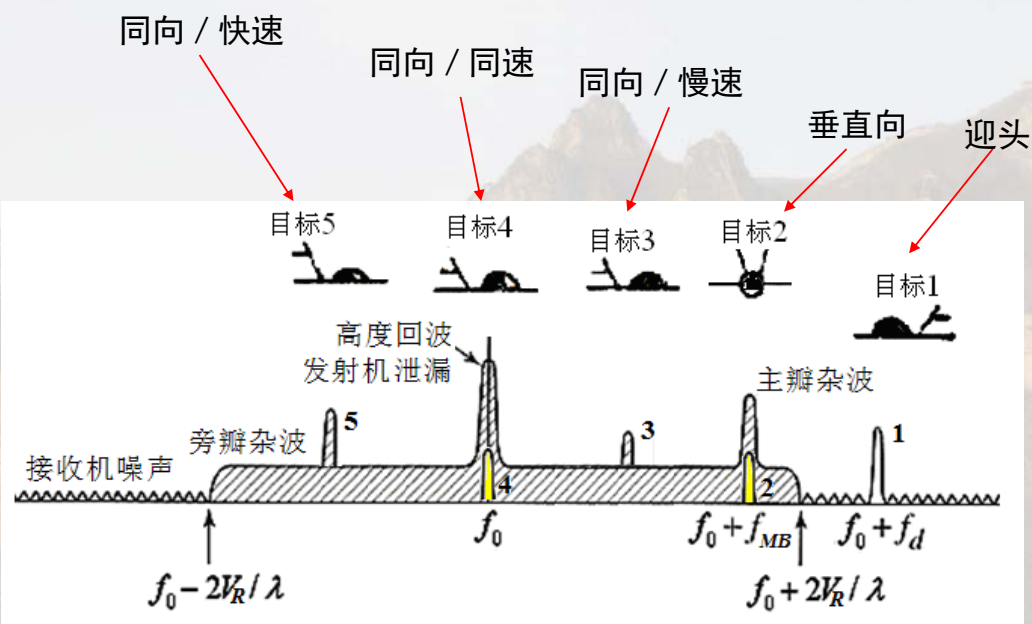


无杂波区:

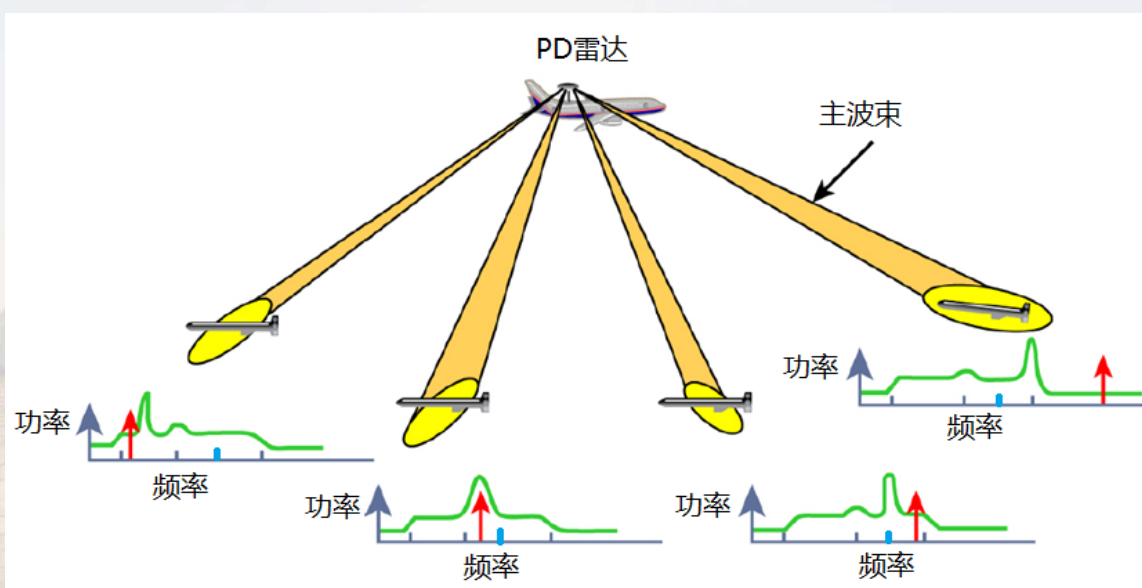
该区域不受杂波的影响，只有接收机噪声影响，称为无杂波区。这一区域的多普勒频率较高，这相当于是对正前方高速接近的目标进行探测的情况。**无杂波区的存在是高重PD雷达的一大优点，特别是需要探测远距离处高速接近的目标时。**



不同目标，相同观测方位



同一目标，不同观测方位

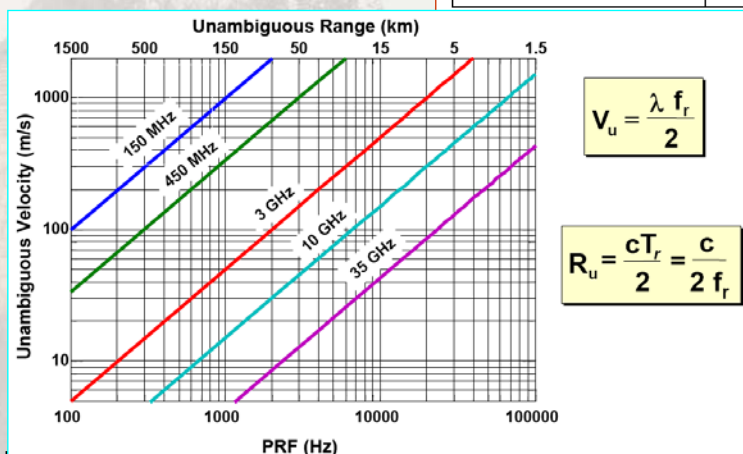


- ❑ 主波束杂波多普勒频率取决于雷达天线扫描方向
- ❑ 目标多普勒频率取决于雷达天线扫描方向和目标所在方位

不同脉冲重复频率雷达系统的比较

三种 PRF 的比较

雷达	PRF	占空比
X 波段高重 PD 雷达	100-300 kHz	<0.5
X 波段中重 PD 雷达	10-30 kHz	0.05
X 波段低重脉冲雷达	1-3 kHz	0.005
UHF 波段低重 AMTI	300 Hz	低



Xu: Radar Systems, Chapter-10

65

谢谢，请批评指正

许小剑

北京航空航天大学电子信息工程学院

Tel: 010-82316065

Email: xiaojianxu@buaa.edu.cn