

# 北京航空航天大学研究生院 《现代雷达系统理论》

## 第12讲：课程小结

北京航空航天大学 许小剑  
2020年秋季学期

Xu: Radar Systems, Summary

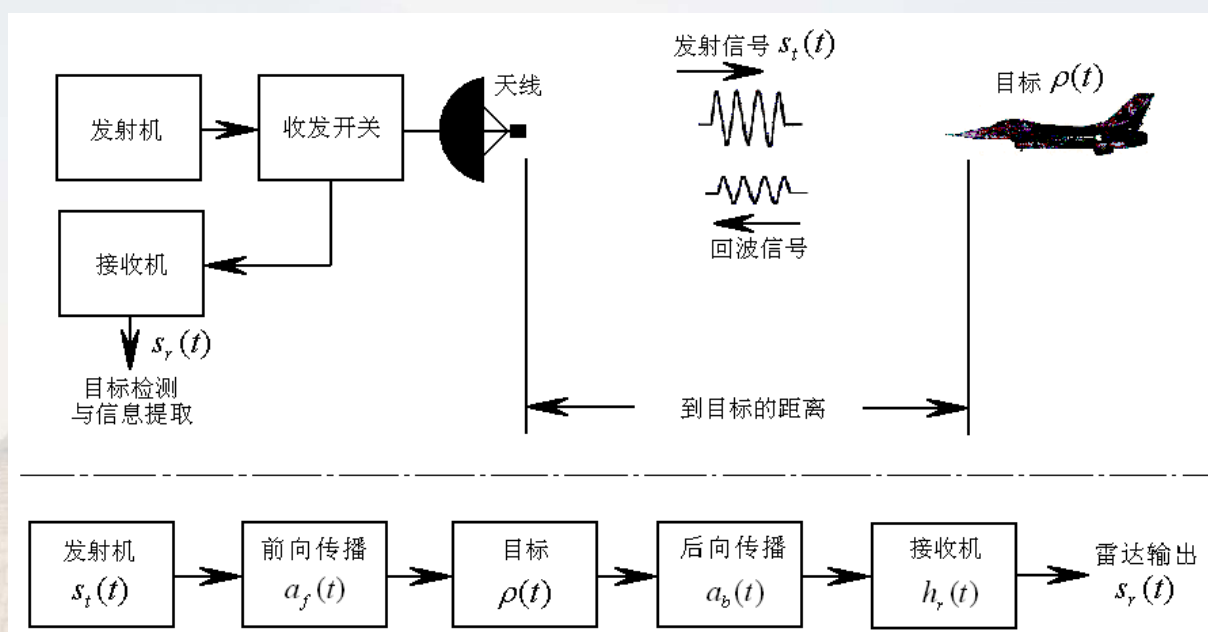
## 课程小结

- 系统与信号模型
- 雷达测距与测速
- 雷达方程与目标探测
- 雷达波形与目标分辨
- 雷达目标与环境特性
- 先进雷达概念与技术

Xu: Radar Systems, Summary

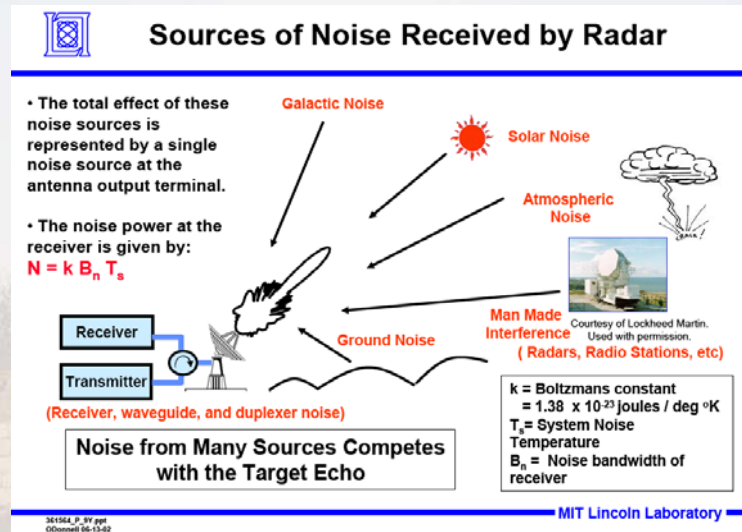
## 系统与信号模型

## 雷达系统同目标与环境的相互作用



$$s_r(t) = s_t(t) * a_f(t) * \rho(t) * h_r(t) * a_b(t)$$

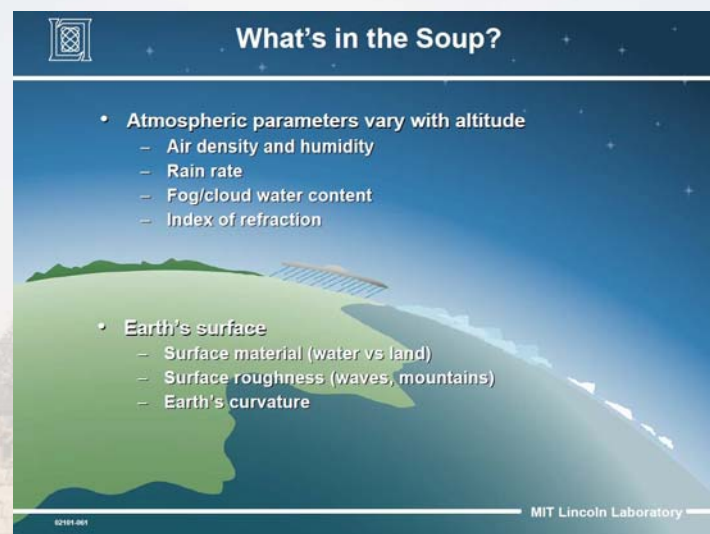
## 噪声对雷达系统的影响：加性噪声



$$s_r(t) = s_t(t) * a_f(t) * \rho(t) * a_b(t) * h_r(t) + n(t)$$

噪声与雷达发射信号无关！

## 环境杂波对雷达系统的影响：信号模型



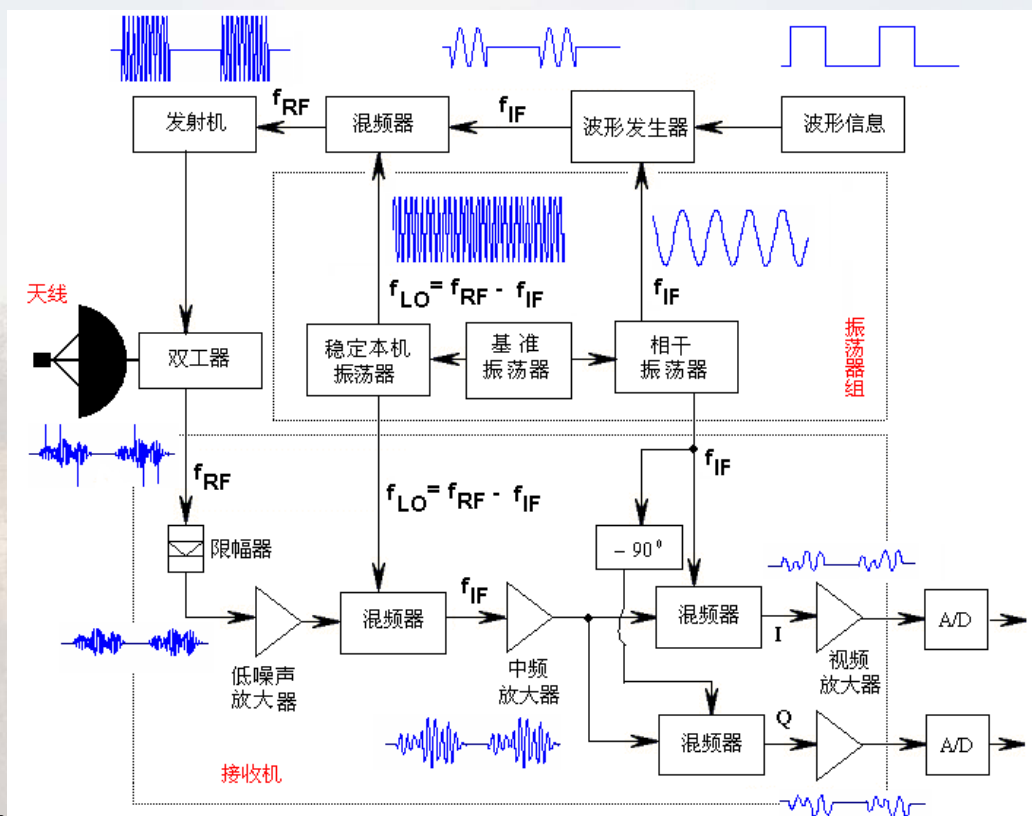
$$s_r(t) = s_t(t) * a_f(t) * [\rho(t) + C(t)] * a_b(t) * h_r(t) + n(t)$$

杂波与雷达发射信号有关！

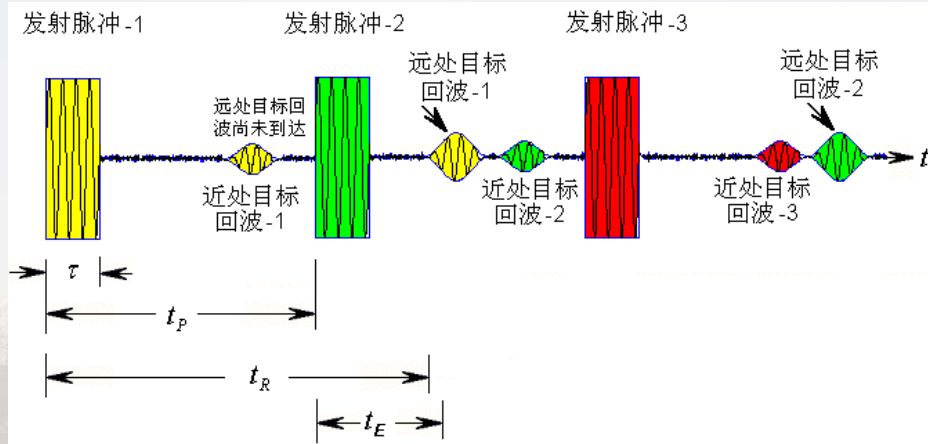
噪声与雷达发射信号无关！

# 雷达测距与测速

## 相参雷达各点波形小结

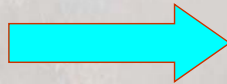


## 雷达测距



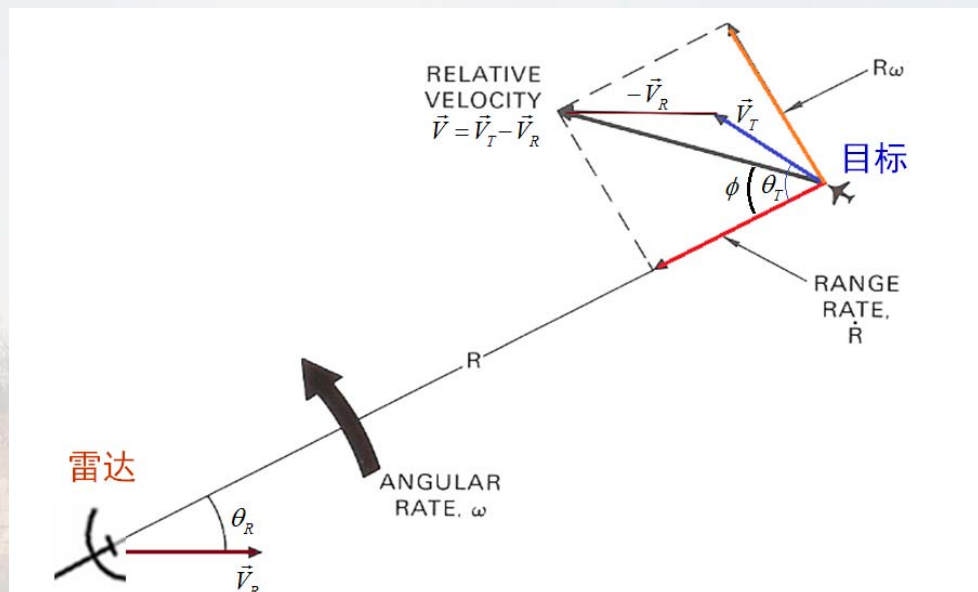
**无距离模糊的条件：** 在发射下一个脉冲前，距离最远处目标的回波已经达到接收机。

$$R = \frac{1}{2} c t_R$$

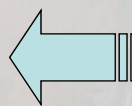


$$R_{\max} = \frac{1}{2} c (t_p - \tau) \approx \frac{1}{2} c t_p$$

## 雷达测速



$$f_d = \frac{\omega_d}{2\pi} = \frac{2V_r}{\lambda}$$



$$V_r = |\vec{V}_T - \vec{V}_R| \cos \phi$$



## 雷达测距测速基本限制

测距不模糊:

$$R_{\max} \leq \frac{1}{2} c t_p = \frac{c}{2 f_p}$$

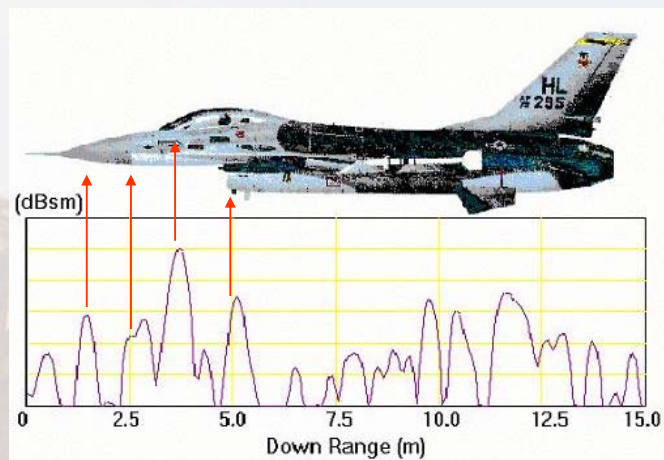
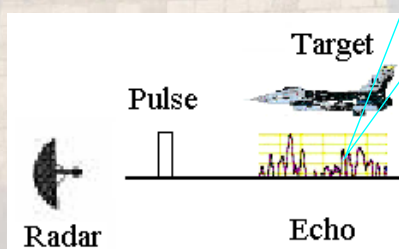
测多普勒不模糊:

$$f_{d \max} = \frac{1}{2} f_p \text{ (考虑运动方向)} \Rightarrow V_{\max} = \frac{\lambda}{2} f_{d \max} \leq \frac{\lambda}{4} f_p$$

$$R_{\max} \cdot V_{\max} \leq \frac{\lambda \cdot c}{8}$$

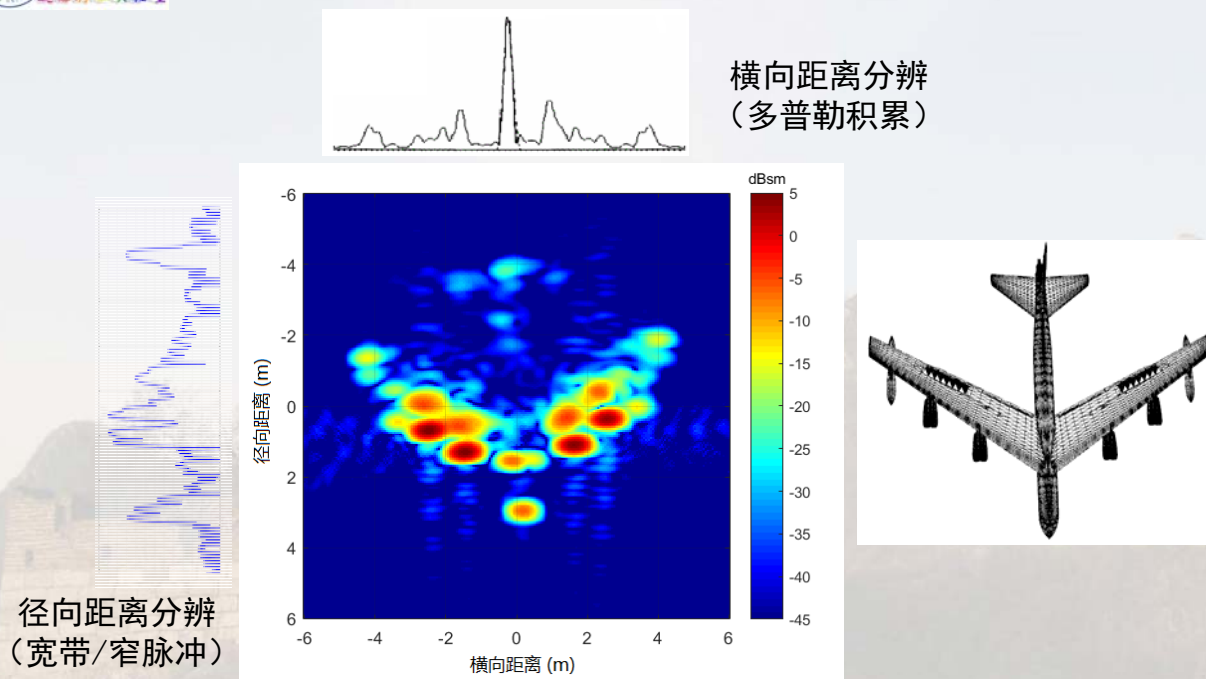
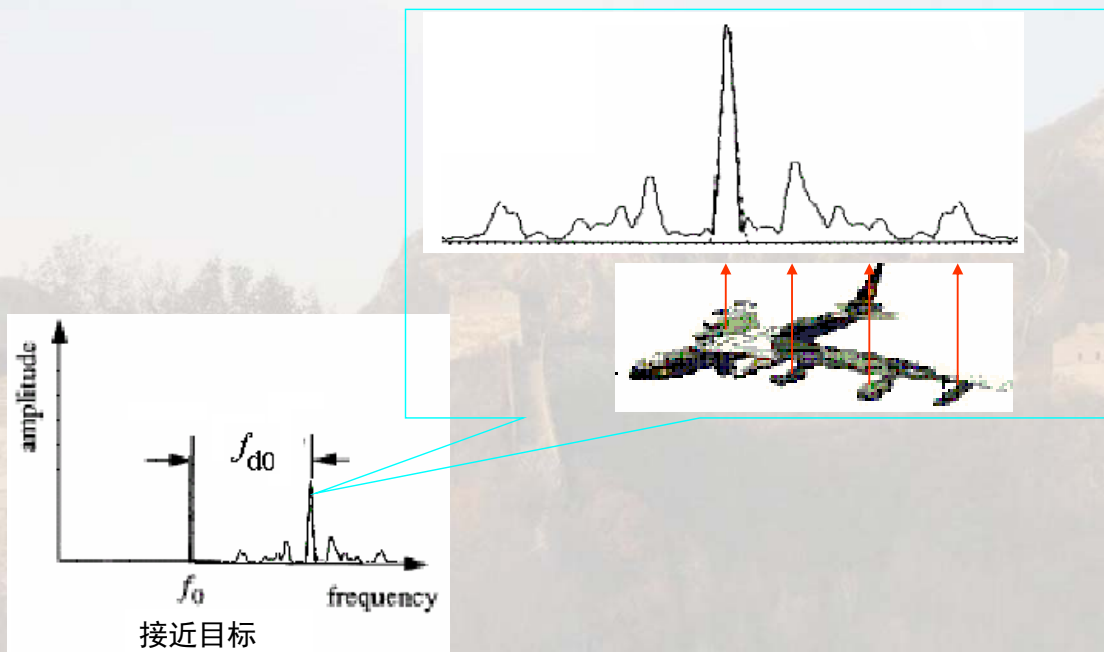
雷达系统设计首先就是必须在这对矛盾中进行折中设计，并采取其他必要补救措施，保证同时完成测速和测多普勒！

## 扩展目标的“测距” – 高分辨距离像



采用等效带宽大的信号：可采用短脉冲、LFM、SFW、NLFM、相位编码等波形。

## 扩展目标测多普勒 --- 高分辨横向距离像



## 目标距离-多普勒二维高分辨成像

## 雷达测量的不确定性

$$\beta^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (2\pi f)^2 |S(f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2 df} = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} (2\pi f)^2 |S(f)|^2 df$$

$$\alpha^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (2\pi t)^2 s^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt} = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} (2\pi t)^2 s^2(t) dt$$

$$\delta T_R = \frac{1}{\beta \sqrt{2E/N_0}}$$

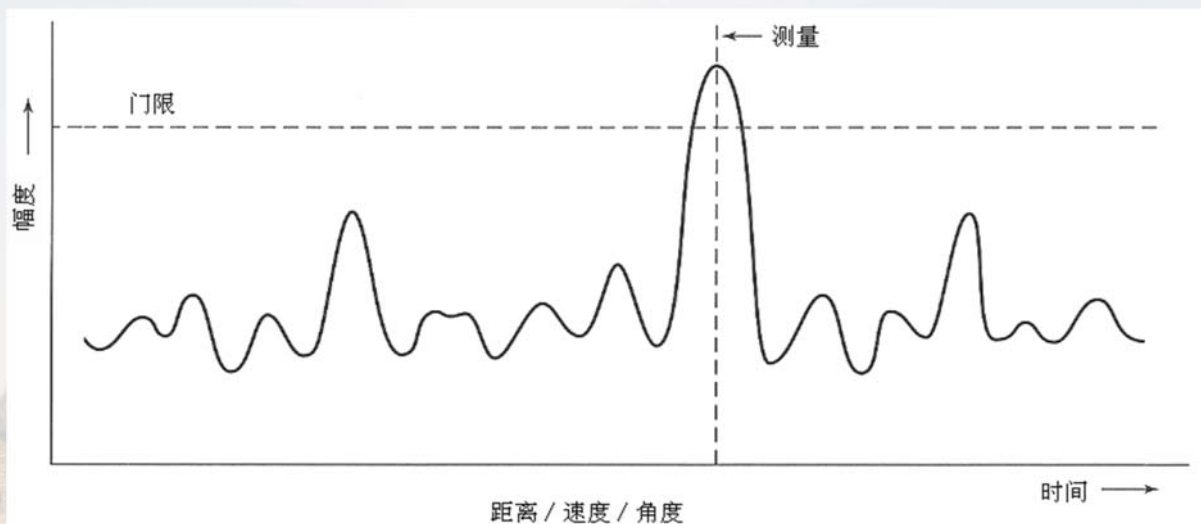
$$\delta f = \frac{1}{\alpha \sqrt{2E/N_0}}$$

$$\beta\alpha \geq \pi$$

$$\delta T_R \delta f \leq \frac{1}{\pi(2E/N_0)}$$

$$\delta T_R \delta f = \frac{1}{\beta\alpha(2E/N_0)}$$

## 雷达测距、测速与测角的一统性

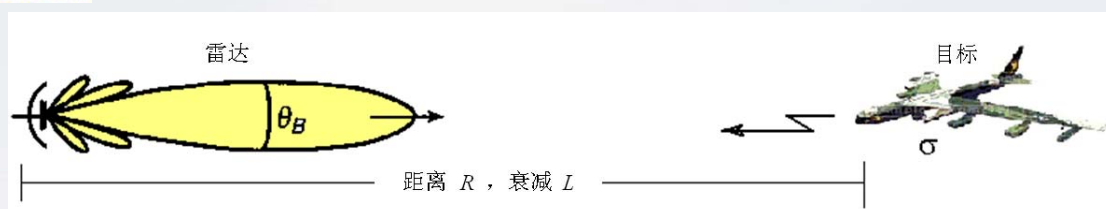


尽管雷达测距、测速和测角的手段是各不相同的，但是它们都采用相同的概念，即发现一个输出波形的最大值所在位置，它决定了目标的距离、角度、或径向速度：

- **雷达测距(时延)** — 目标回波的时域波形输出
- **雷达测角** — 天线方向图的俯仰/方位扫描输出
- **雷达测速(多普勒频率)** — 可调谐滤波器的多普勒频率输出信号波形



## 雷达方程与目标探测



### 雷达方程推导过程总结

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot \frac{1}{4\pi R^2} \cdot \sigma \cdot \frac{1}{4\pi R^2} \cdot \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \cdot \frac{1}{L}$$

接收回波的功率

发射机功率

定向天线发射功率

目标处入射功率密度

目标散射的功率

接收机处回波功率密度

未考虑损耗时的回波功率

系统和传播损耗

## 雷达方程中的比例关系

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L}$$

$$R_{\max} = \left[ \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 \cdot \text{SNR}_{\min} N \cdot L} \right]^{1/4}$$

如果雷达原来的作用距离1000km，现要将雷达作用距离提高至2000km。如何做到？

以下途径均能实现距离加倍：

- 功率提高至16倍 (12dB)
- 天线口径提高至2倍 (3dB)
- 目标RCS增加至16倍 (12dB，但目标一般不取决于你！)
- 积累时间提高至16倍 (12dB)
- 接收机噪声电平降低16倍 (12dB)
- 上述途径的任意合理组合

## 如何计算雷达接收机的灵敏度？

接收机输出信噪比：

$$P_{so} = P_{si} \cdot G$$

$$N_o = K T_s B_n \cdot F \cdot G$$

$$= N_i \cdot F \cdot G$$

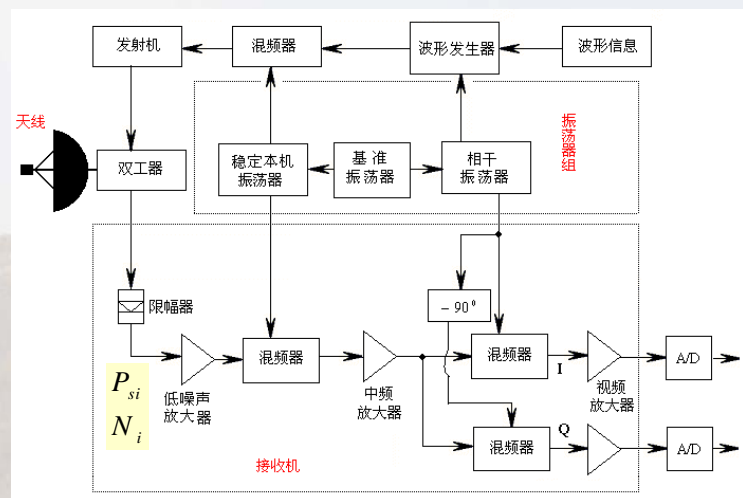
$$\text{SNR}_o = \frac{P_{so}}{N_o} = \frac{P_{si} \cdot G}{N_i \cdot F \cdot G}$$

$$= \frac{P_{si}}{N_i \cdot F}$$

接收机灵敏度：

$$P_{si} \big|_{\text{SNR}_0=1} = N_i \cdot F$$

$$= K T_s B_n \cdot F$$



- 接收机灵敏度：输出SNR=1时的输入信号功率电平
- 输入噪声：由天线、传输线、外部噪声等共同决定
- 输出噪声：由输入噪声、接收机内部噪声以及接收增益共同决定（等效放大器模型）

## 如何计算雷达接收机的输出信噪比？

### 接收机输入信噪比：

$$SNR_i = \frac{P_{si}}{N_i}$$

$$P_{si} = P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L}$$

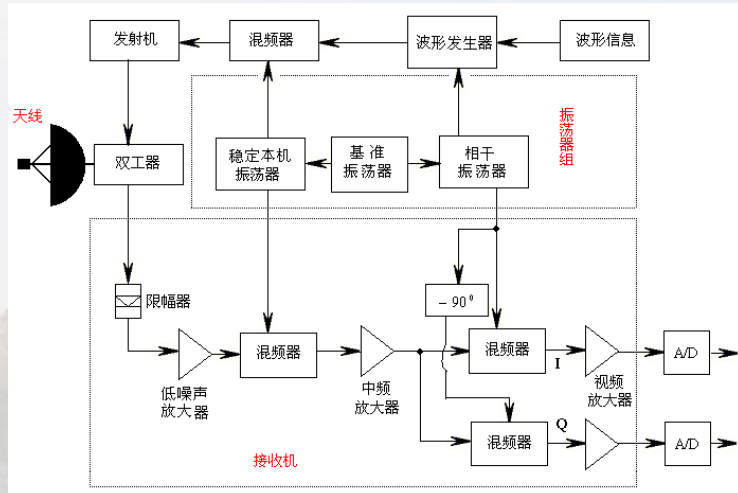
$$N_i = K T_s B_n$$

### 接收机输出信噪比：

$$SNR_o = \frac{P_{so}}{N_o}$$

$$P_{so} = P_{si} \cdot G$$

$$N_o = K T_s B_n \cdot F \cdot G$$



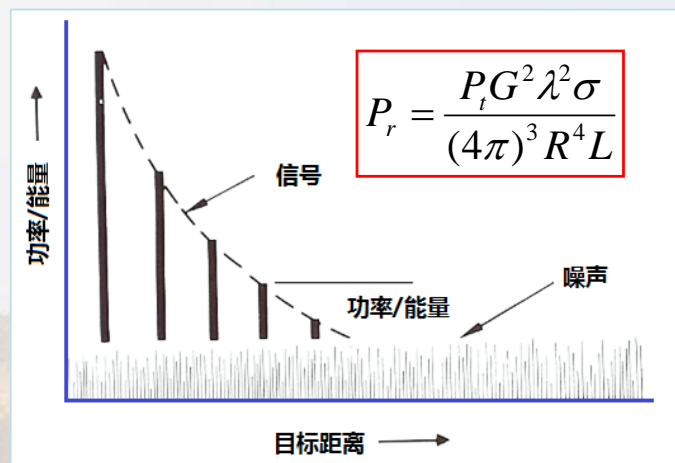
- (1) “点” 目标假设 + “功率” 假设；
- (2) 各种因素是如何影响雷达输入信号：由雷达方程回答
- (3) 雷达接收机输出噪声如何计算：由等效放大器模型回答

## 雷达目标检测依赖于信噪比

为了能使雷达可靠地检测目标，一般要求接收到的回波功率 $P_r$ ，必须超过某个最小可检测信号功率 $P_{s \min}$  (门限)

当  $P_r = P_{s \min}$

( $E_r = E_{s \min}$ )

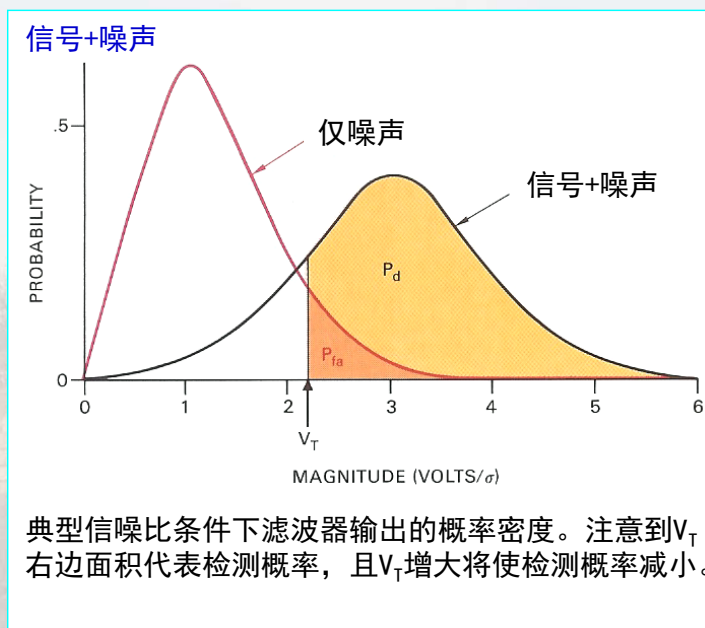


时的距离，称为雷达检测该目标的**最大作用距离**

$$R_{\max} = \left[ \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{s \min} L} \right]^{1/4}$$

$$R_{\max} = \left[ \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 \cdot SNR_{i \min} N_i \cdot L} \right]^{1/4}$$

## 检测概率与虚警概率：



## 雷达波形与目标分辨



## 雷达模糊度函数 (AF) 定义

AF定义为:

$$\chi(\tau, f_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) u^*(t - \tau) e^{j2\pi f_d t} dt$$

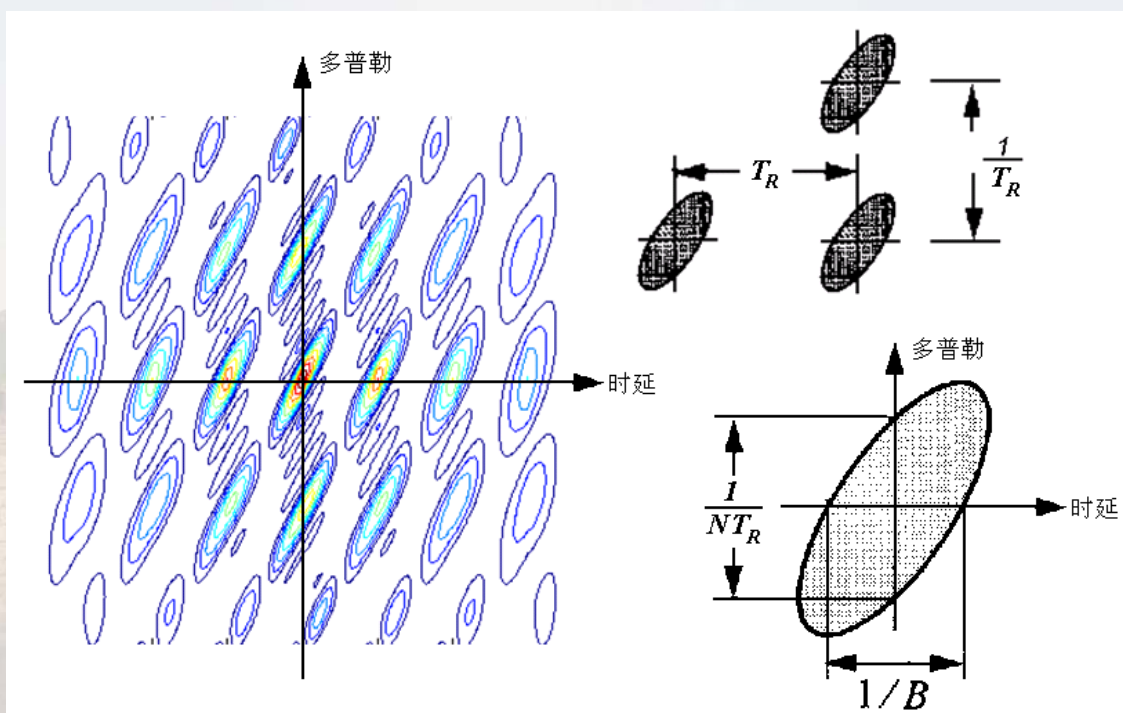
它描述了当目标信号实际到达时刻同接收机设定的滤波器匹配时刻存在一个时间差 $\tau$ ，信号多普勒频率同设定的滤波器匹配多普勒频率之间存在一个频率差 $f_d$ 时，目标回波输出同设定的匹配接收机输出之间的失配程度。

注意到在推导中，我们假设期望目标的时延和多普勒均为0。因此，上式中参量 $\tau$ 同目标实际距离 $R_r$ 和设定的匹配距离 $R_m$ ， $f_d$ 同目标实际径向速度 $V_r$ 和设定的匹配径向速度 $V_m$ 之间有如下关系：

$$\tau = \frac{2(R_r - R_m)}{c}$$

$$f_d = \frac{2(V_r - V_m)}{\lambda} = \frac{2(V_r - V_m)}{c} f_0$$

## LFM脉冲串 AF的轮廓图





## 几种典型雷达波形的分辨与模糊特性总结

波形	时延（距离）切片		多普勒（速度）切片	
	第一个零点	第一个模糊	第一个零点	第一个模糊
单频脉冲 ( $t_p$ )	$t_p$	—	$\frac{1}{t_p}$	—
LFM 脉冲 ( $t_p, B$ )	$\frac{1}{B}$	—	$\frac{1}{t_p}$	—
单频脉冲串 ( $t_p, N, T_R$ )	$t_p$	$T_R$	$\frac{1}{NT_R}$	$\frac{1}{T_R}$
LFM 脉冲串 ( $t_p, B, N, T_R$ )	$\frac{1}{B}$	$T_R$	$\frac{1}{NT_R}$	$\frac{1}{T_R}$

Xu: Radar Systems, Summary

## 雷达对目标的两维分辨率

$$\delta_r = \frac{c}{2B}$$

**径向距离分辨率**取决于雷达信号波形的频带宽度，两者成反比关系：  
波形带宽越宽，径向距离分辨率越高！

$$\delta_c = \frac{\lambda}{2\Delta\theta_m}$$

**横向距离分辨率**由雷达-目标间相对旋转运动形成的多普勒频率而得到，同转角大小成反比：相对转角越大，横向距离分辨率越高！

Xu: Radar Systems, Summary

## 雷达目标与环境特性

## 如何理解复杂目标的RCS

### RADAR CROSS SECTION

影响复杂目标RCS的因素主要有三个方面：目标的**几何横截面积** (Geometric Cross Section)、目标**材料的反射率** (Reflectivity)、目标的**方向性** (Directivity)

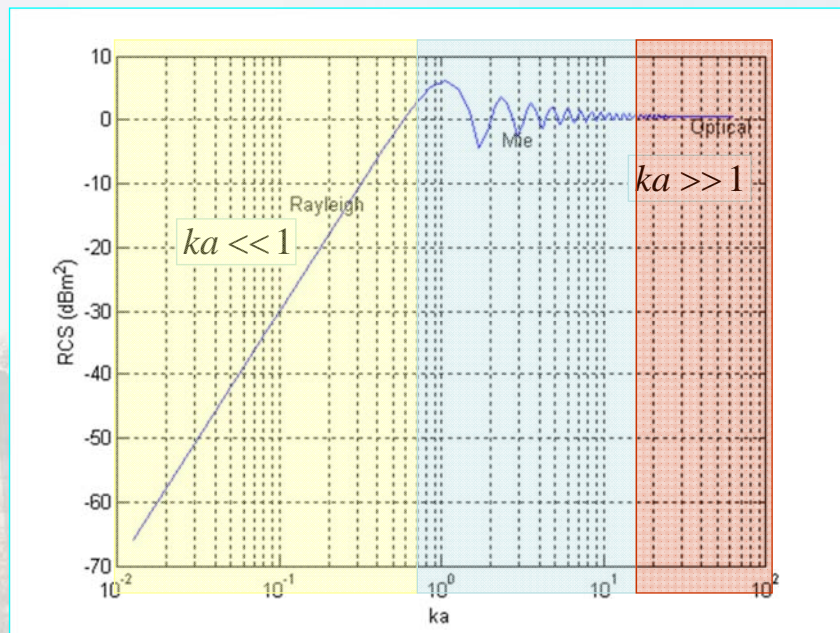
$$\sigma = \text{Geometric Cross Section} \times \text{Reflectivity} \times \text{Directivity}$$

$$\sigma = A_T \cdot \gamma_T \cdot D_T$$

## 目标散射随频率的变化特性：三个分区

金属球电磁散射随频率变化的三个区：

- 瑞利区 (Rayleigh)
- 谐振区 (Mie)
- 光学区 (高频区)

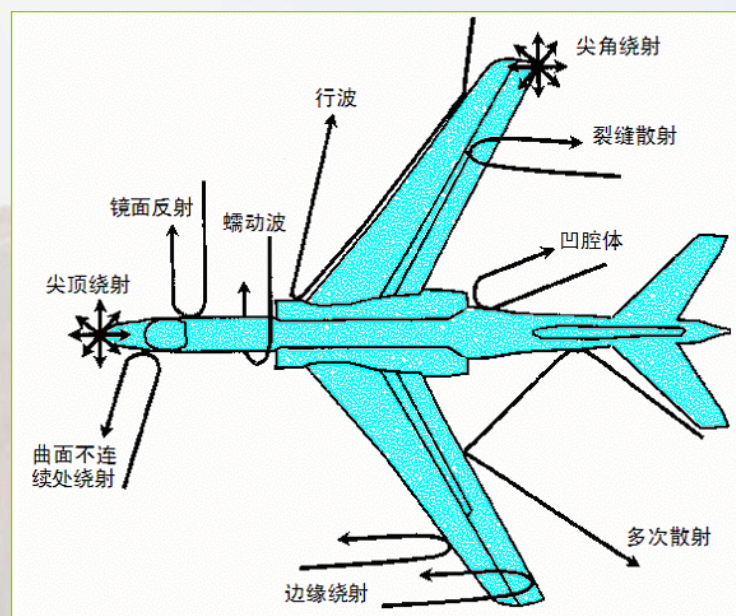
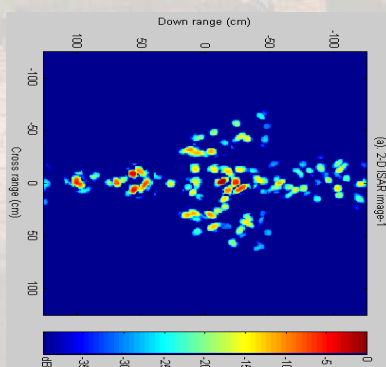


任何目标散射随频率的变化特性都存在类似的三个区，但各区之间的分界线并非完全确定。

## 复杂目标的高频散射机理：散射中心概念

目标散射主要可分为以下类型：

- 镜面反射点
- 边缘（棱线）绕射
- 尖端散射
- 凹腔体等多次反射型散射
- 行波及蠕动波散射
- 天线型散射等





## 人造目标与自然目标的SAR成像特性差异

□ 雷达是一种工作在高频谱段的带通系统，其所获取的成像数据是限带的（有限频段、有限视角）、频偏的（载波频率大于零）；

□ 大多数人造目标具有“光滑”的表面，且介电特性比较均匀，这等效于“零相位”物体，故其SAR图像呈现出稀疏特性：表现为在物体不连续处的一些离散“散射中心”的集合；

□ 多数自然场景具有“粗糙”的表面和非均匀介电特性，等效于“随机相位”物体，故其SAR图像一般呈现出带斑点的轮廓图，形状信息在SAR图像中在一定程度上得以保留。



- ◆ “光滑”表面目标的SAR图像具有稀疏特性，“粗糙”表面的SAR图像具有轮廓特性；
- ◆ 这种特性不随频段（“高频区”）、分辨率、极化等成像条件而改变；
- ◆ 传统图像处理技术难以胜任稀疏目标的雷达图像理解和解译。

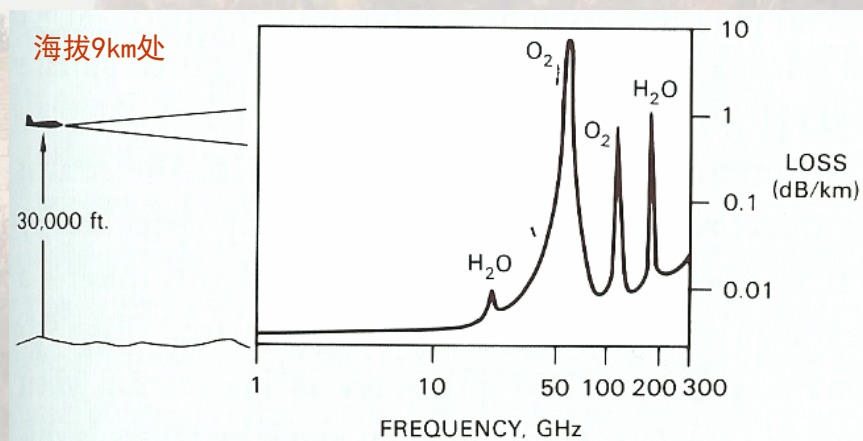
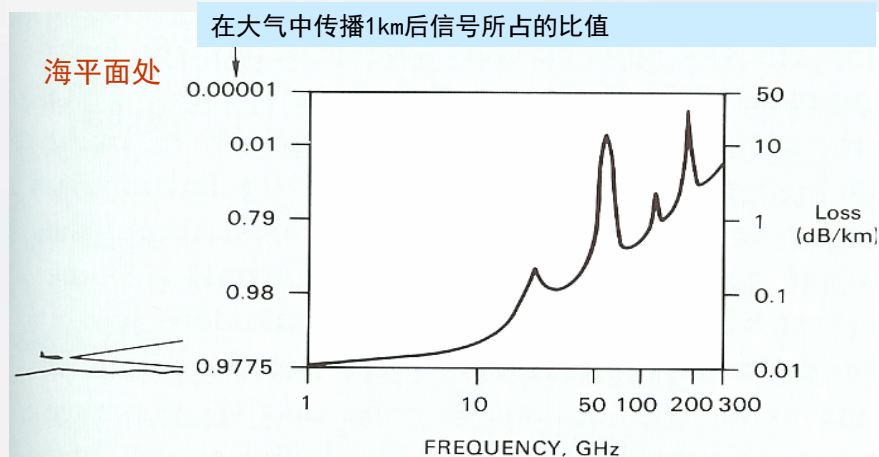
## 为何要理解雷达系统与外部环境的相互作用？

### What's in the Soup?

- Atmospheric parameters vary with altitude
  - Air density and humidity
  - Rain rate
  - Fog/cloud water content
  - Index of refraction
- Earth's surface
  - Surface material (water vs land)
  - Surface roughness (waves, mountains)
  - Earth's curvature

MIT Lincoln Laboratory

因此，较小擦地角传播将产生较大的衰减。



$$d = \sqrt{(R_E + h_a)^2 - R_E^2}$$

$$\approx \sqrt{2R_E h_a} \quad (\text{when } h \ll R_E)$$

$$R_E = 6370 \text{ km}$$

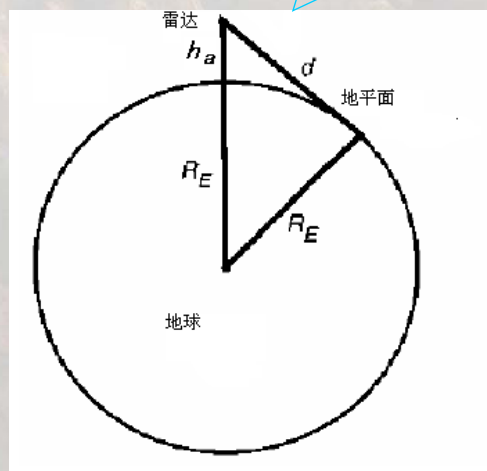
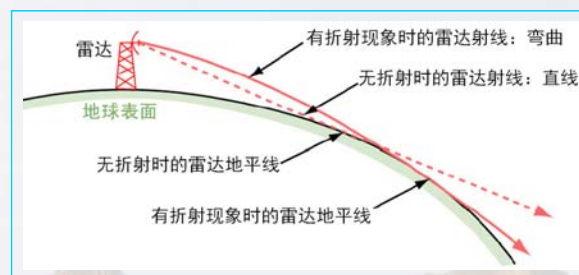


折射效应

等效地球半径:

$$R'_E = \alpha R_E \quad (1 < \alpha \leq \frac{4}{3})$$

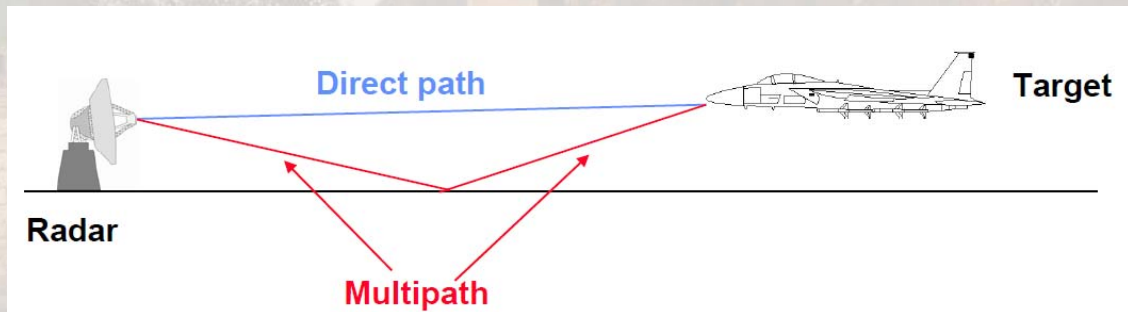
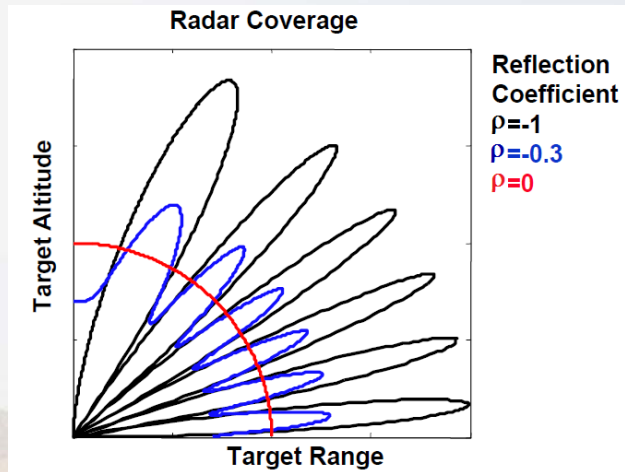
$$\alpha = \frac{1}{1 + R_E \frac{dn}{dh}} \quad (\text{常取为 } 4/3)$$



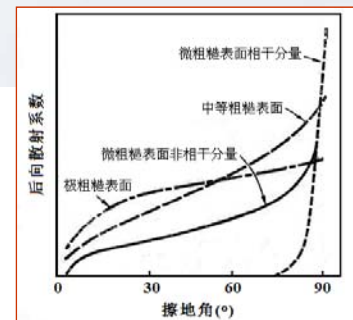
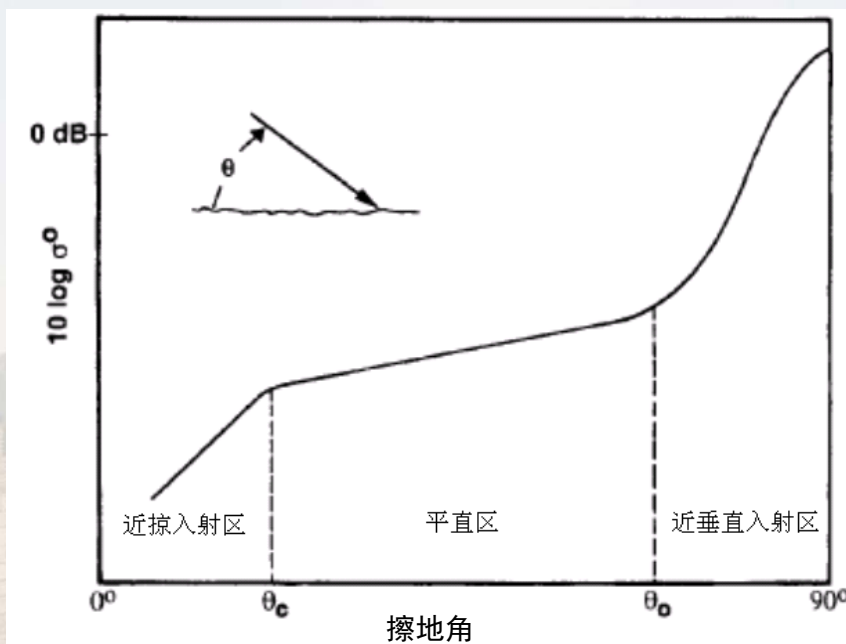


- 多径效应造成波瓣分裂
- 多径效应可使对同一目标的最大探测距离增加至2倍
- 多径效应也可使雷达根本无法探测到同一目标

为什么？



$$\vec{E}_0 = \vec{E}_{01}e^{-jkL_1} + 2\rho\vec{E}_{02}e^{-jkL_2} + \rho^2\vec{E}_{03}e^{-jkL_3}$$

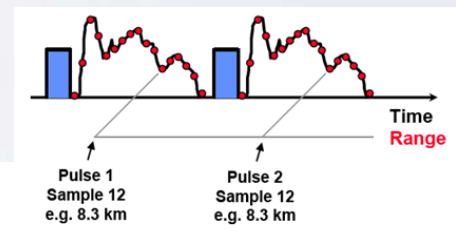
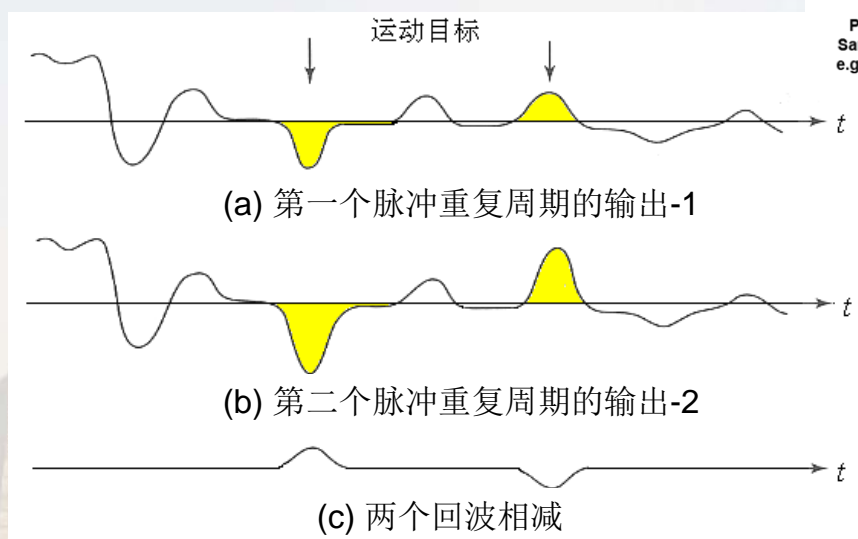


$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{A}$$

粗糙面散射随擦地角变化的一般特性

# 先进雷达概念与技术

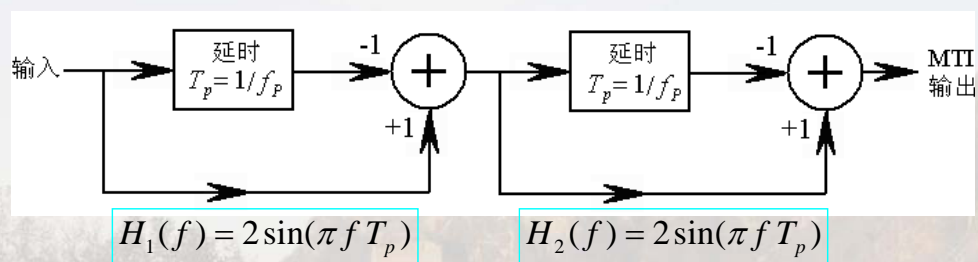
## 杂波对消概念



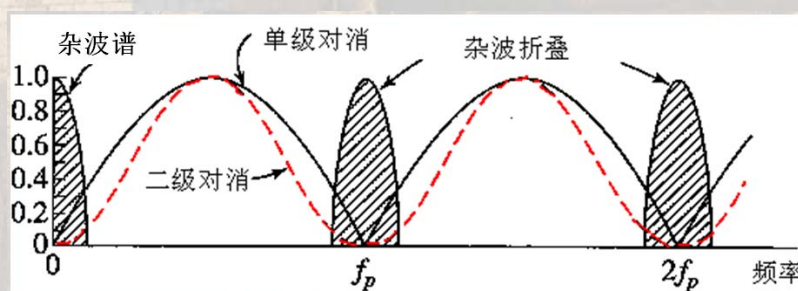
**静止杂波的对消：** (a) 运动目标和静止杂波的鉴相器输出-1； (b) 运动目标和静止杂波的鉴相器输出-2； (c) 两个信号相减，静止杂波因不随时间变化而被对消，只保留了运动目标的信号。

# MTI雷达

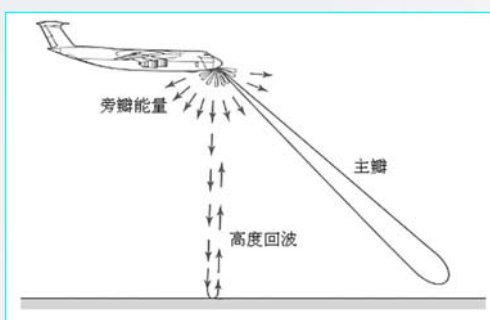
单级与二级延时线对消器：



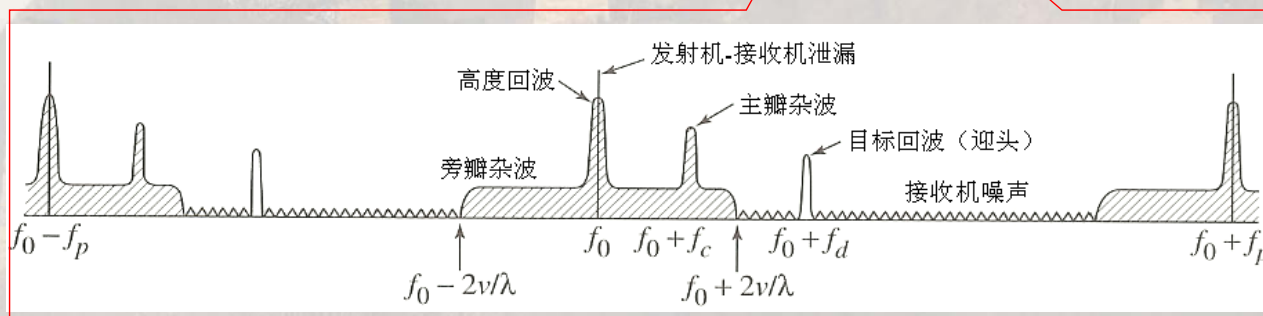
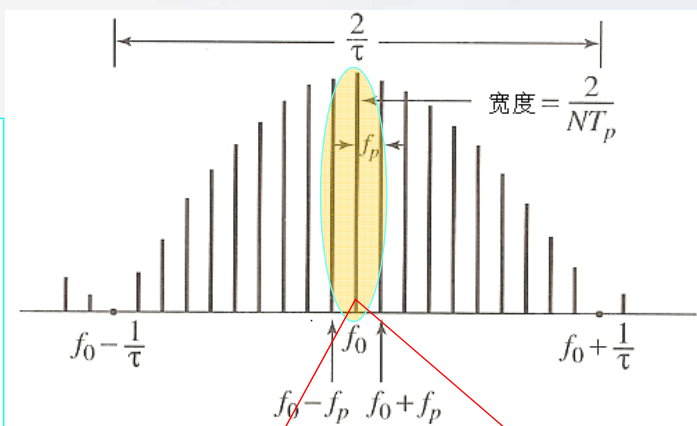
$$H(f) = H_1(f)H_2(f) = 4 \sin^2(\pi f T_p)$$



# PD雷达

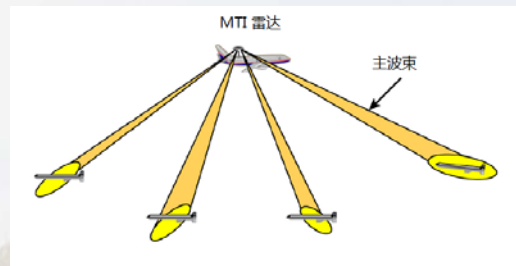


发射N个脉冲串的频谱



接收信号在载频附近的频谱分量

## 运动平台的影响

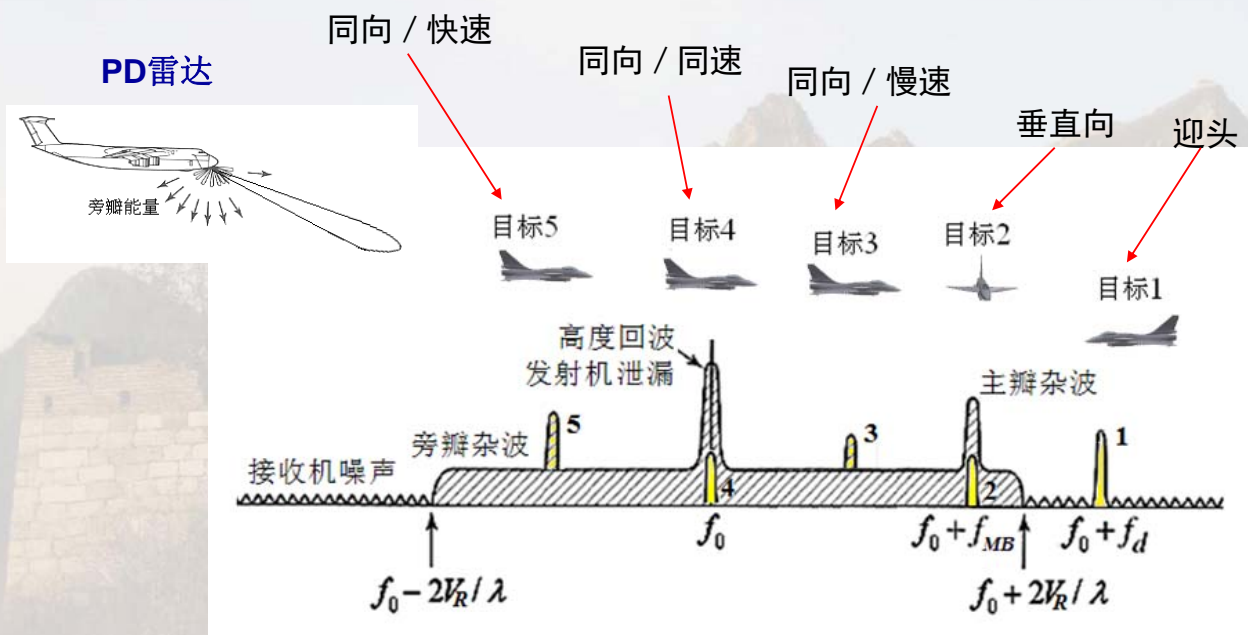


运动平台造成的主要影响：

**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。

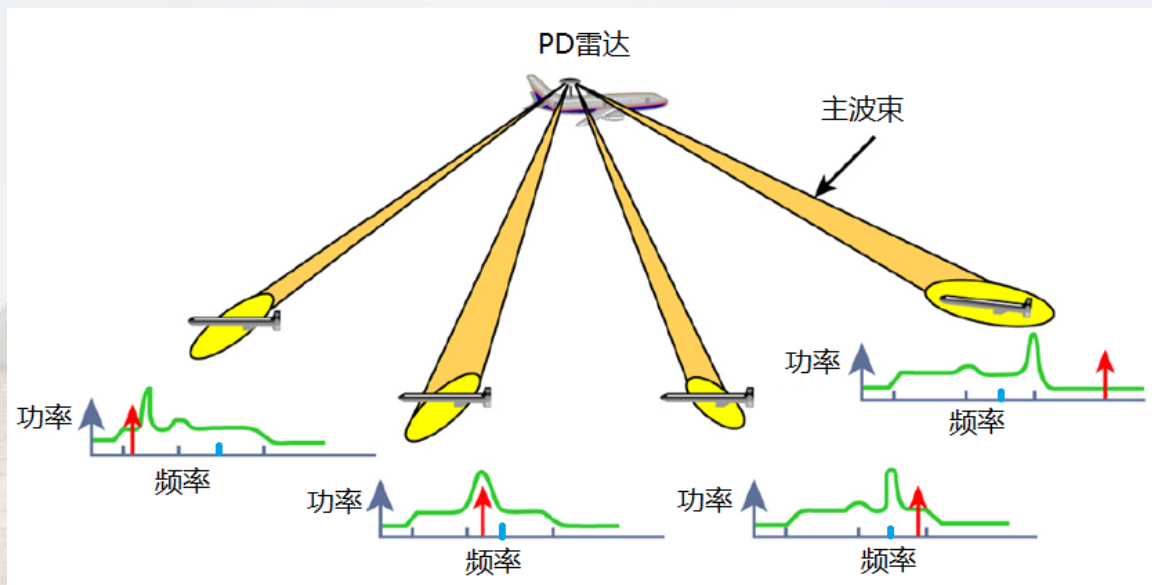
**杂波谱的展宽：**由于雷达天线的波束有一定宽度而造成，因为当雷达波束有一定宽度时，来自于不同雷达分辨单元的杂波具有不同的多普勒频率。

## 不同目标，相同观测方位





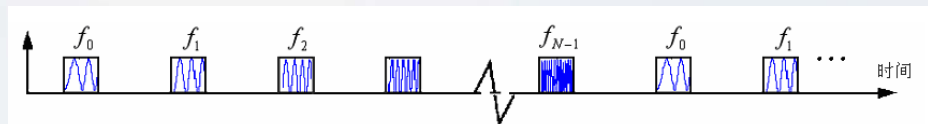
## 同一目标，不同观测方位



- 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

## 频率步进波形 (SFW)

$$\delta_r = \frac{c}{2B} = \frac{c}{2 \cdot N \cdot \Delta f}$$



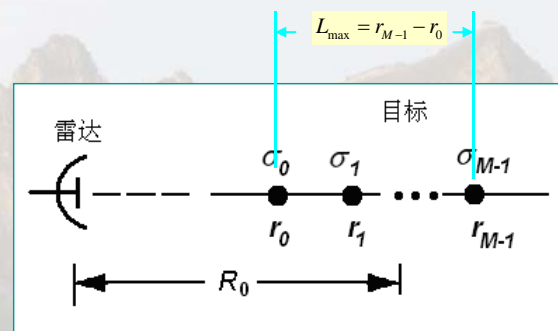
若假设参考距离处即为目标中心，目标的尺寸为：

$$L_{\max} = r_{M-1} - r_0$$

(注意式中比参考距离近的 $r$ 为负值！)

根据采样定理，为了不引起距离像混叠，要求

$$\Delta f \leq \frac{c}{2L_{\max}}$$



可见，在SFW脉冲雷达中，频率步进间隔的大小是受到目标最大尺寸限制的。在满足此条件下，提高距离分辨率的途径是增加一个脉冲串内的频率步进脉冲个数 $N$ ，也即增大信号带宽。

因为“合成”意味高分辨率距离像处理采用IDFT，这实际上是在目标尺寸一定时，增加了IDFT的点数，相当于增加不模糊距离单元的个数，即对目标“更细分”。



## 线性调频 (LFM) 波形

中频回波信号总带宽:

$$B_{IF} = f_{\Delta 1} - f_{\Delta M} = \gamma \frac{2L}{c}$$

(同目标尺寸成正比)

发射信号的射频带宽:

$$B_{RF} = \gamma t_p$$

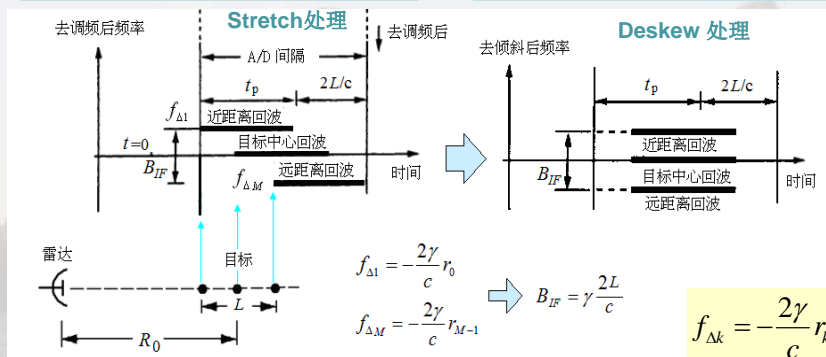
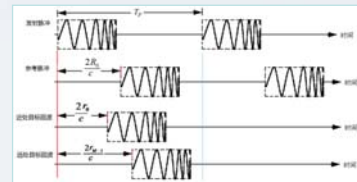
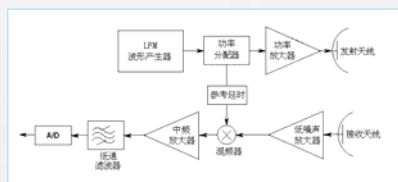
两者之比:

$$\frac{B_{IF}}{B_{RF}} = \frac{2L}{ct_p} = \frac{L}{ct_p / 2}$$

目标尺寸

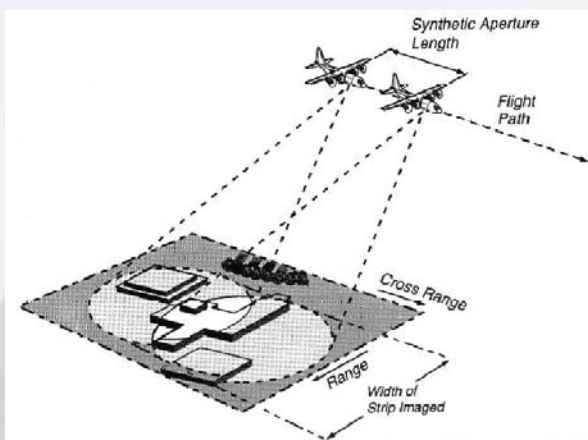
(若发射脉宽远大于目标尺寸, 则此比值远小于1)

发射脉冲占据的距离窗口尺寸



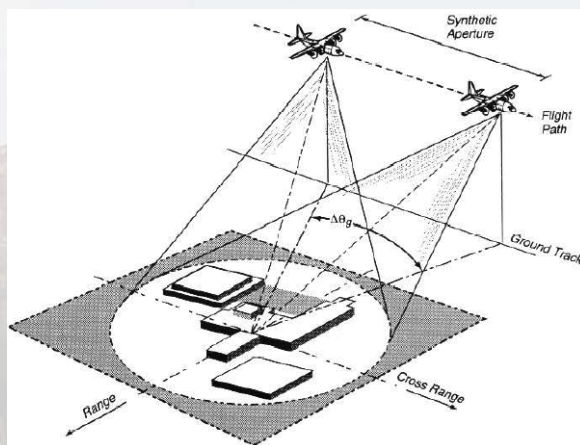
## SAR成像雷达

条带式 (Stripmap SAR)



$$\delta_{cr} \geq \frac{D}{2}$$

聚束式 (Spotlight SAR)



$$\delta_c = \frac{\lambda}{2\Delta\theta_g}$$

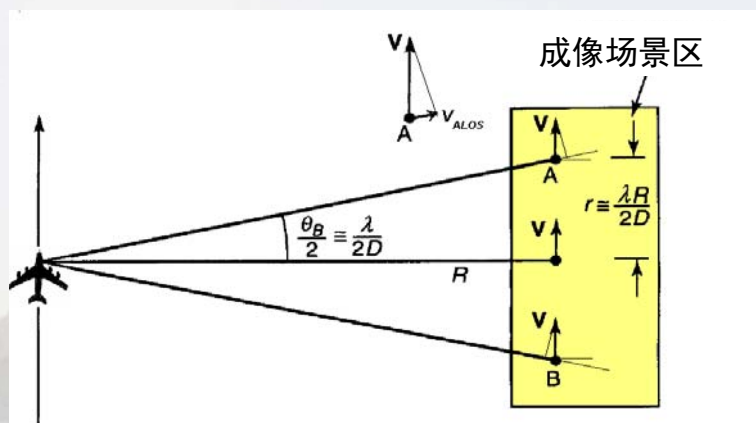
## SAR成像雷达设计基本限制条件

天线波束宽度:  $\theta_B = \frac{\lambda}{D}$

场景两端线速度:

$$V_{ALOS} = -V \sin \frac{\theta_B}{2} \approx -V \frac{\theta_B}{2}$$

$$V_{BLOS} = V \sin \frac{\theta_B}{2} \approx V \frac{\theta_B}{2}$$



总的多普勒带宽:

$$\Delta f_D = \frac{2\Delta V_{\max}}{\lambda} = \frac{2}{\lambda} (V_{BLOS} - V_{ALOS}) = \frac{2V\theta_B}{\lambda} = \frac{2V}{D}$$

若要求多普勒不模糊:

$$f_R > \Delta f_D = \frac{2V}{D}$$

多普勒不模糊:

$$f_R > \Delta f_D = \frac{2V}{D}$$

距离不模糊:

$$f_R < \frac{c}{2R}$$

若平台速度一定, 则要求:

$$V \cdot t_R < \frac{D}{2} \quad \text{且} \quad c \cdot t_R > 2R_{\max}$$

$$\frac{2V}{D} < f_R < \frac{c}{2R_{\max}}$$

$$t_R = 1/f_R$$

感谢各位选课同学一学期来的陪伴，祝大家一切顺利！

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](mailto:xiaojianxu@buaa.edu.cn)