

# 北京航空航天大学研究生院 《现代雷达系统理论》

## 第9讲：雷达系统与外部环境的相互作用

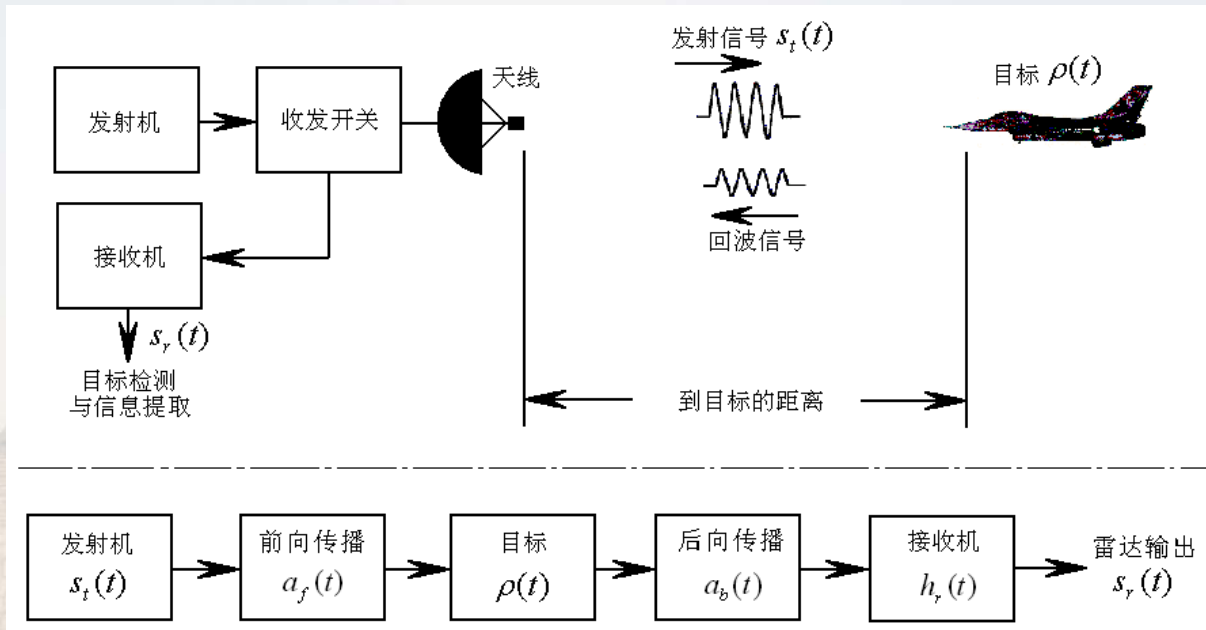
北京航空航天大学 许小剑  
2020年秋季学期

Xu: Radar Systems, Chapter-9

## 第九讲 雷达系统与外部环境的相互作用

- 9.1 地球大气的影响：传播衰减和射线弯曲
- 9.2 地球表面的影响：地球曲率、粗糙表面和多径效应
- 9.3 雷达杂波：地杂波、海杂波、体散射杂波
- 9.4 杂波的多普勒谱特性
- 9.5 杂波统计模型

## 雷达系统同目标与环境的相互作用



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

第五章

第六章

第七章

Xu: Radar Systems, Chapter-9

3

## 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

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

### Sources of Noise Received by Radar

- The total effect of these noise sources is represented by a single noise source at the antenna output terminal.
- The noise power at the receiver is given by:  $N = k B_n T_s$

Galactic Noise, Solar Noise, Atmospheric Noise, Man Made Interference (Radars, Radio Stations, etc), Ground Noise, Receiver, waveguide, and duplexer noise.

Noise from Many Sources Competes with the Target Echo

MIT Lincoln Laboratory

### Why Understand Radar Clutter?

#### Naval Air Defense Scenario

Radar echo is composed of:

- Backscatter from target of interest
- Receiver noise
- Atmospheric noise
- Interference
  - From other radars
  - Jammers
- Backscatter from unwanted objects
  - Ground
  - Sea
  - Rain
  - Chaff
  - Birds
  - Ground traffic

MIT Lincoln Laboratory

Xu: Radar Systems, Chapter-9

4

## 第九讲 雷达系统与外部环境的相互作用

### 9.1 地球大气的影响：传播衰减和射线弯曲

### 9.2 地球表面的影响：地球曲率、粗糙表面和多径效应

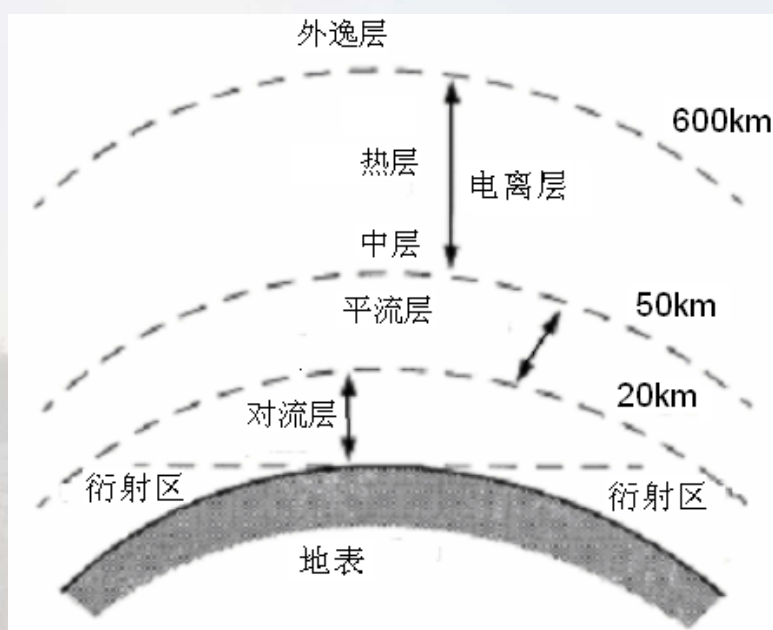
### 9.3 雷达杂波：地杂波、海杂波、体散射杂波

### 9.4 杂波的多普勒谱特性

### 9.5 杂波统计模型

## 地球大气

从地面往上, 通常根据大气温度和密度随高度垂直分布的特征, 大气层可分为对流层、平流层、中层、热层和外逸层等。各层的物理特性可能完全不同。

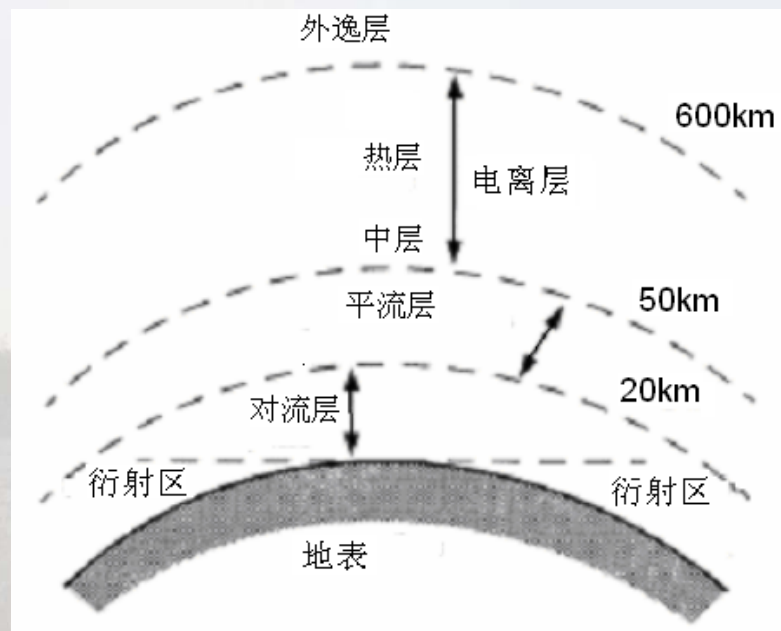


## 地球大气对电波传播的影响

- $f < 4-6$  MHz, 全反射
- $f > 30$  MHz, 完全穿透
- 对高频影响较小

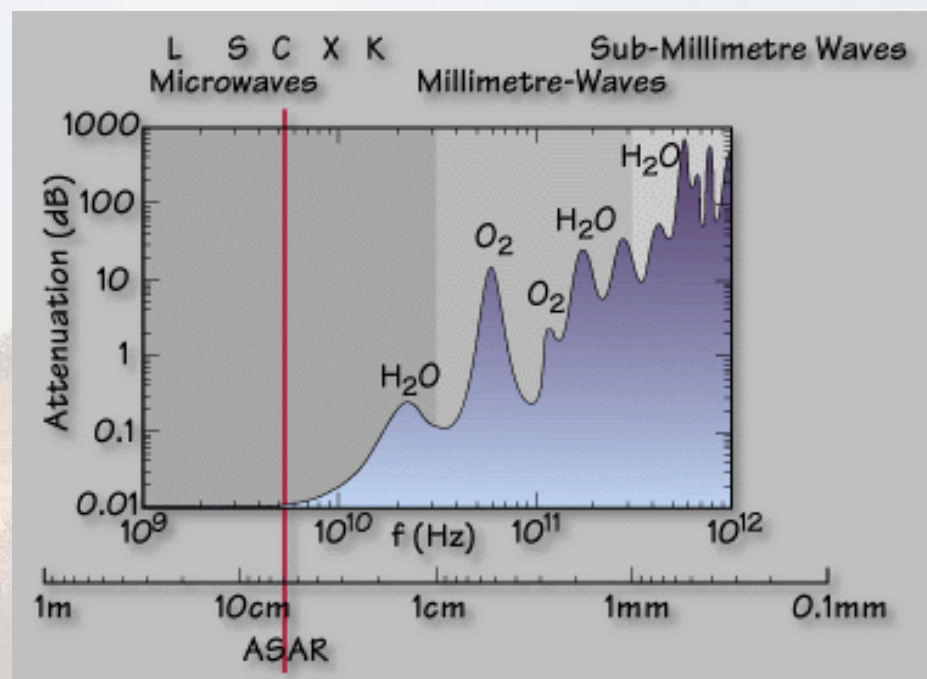
➤ 折射

➤ 绕射



## 大气衰减

- 22.2GHz:  $H_2O$  的吸收
- 60 GHz:  $O_2$  的吸收

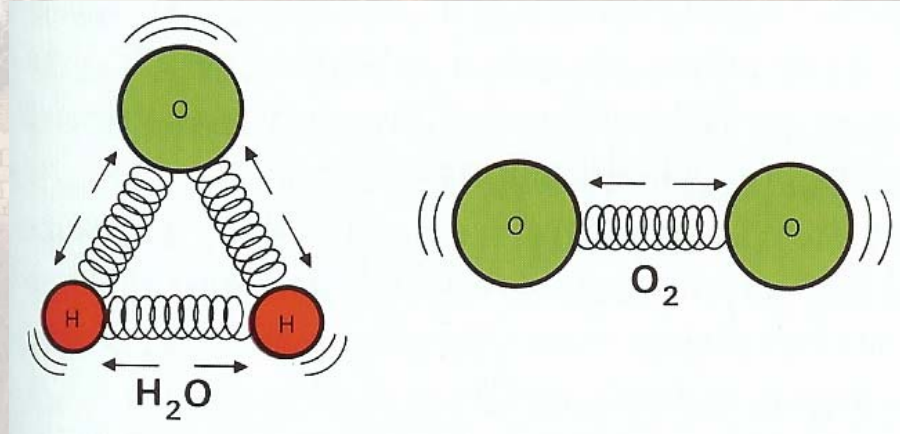
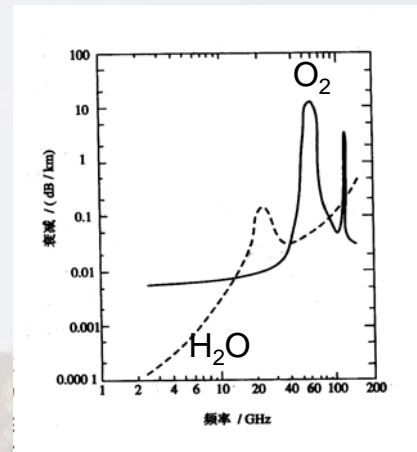


在1THz以下雷达频段，水和氧气是主要的衰减因素。

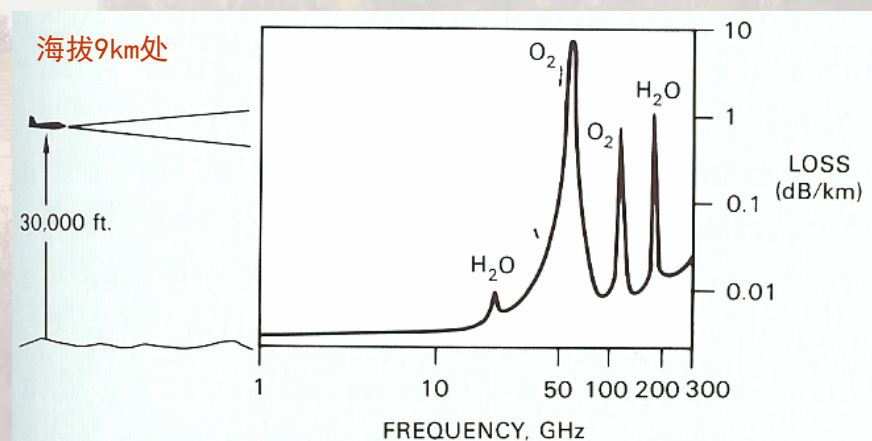
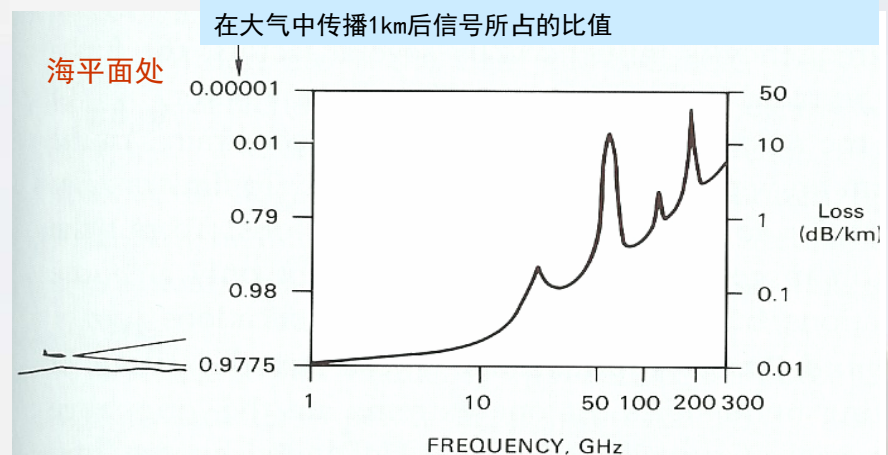


**衰减峰谱线：**水气和氧气分子具有同自身原子分子结构所对应的谐振频率。当受到同频率的电磁能量激励时产生谐振，就会将激励电磁能吸收。

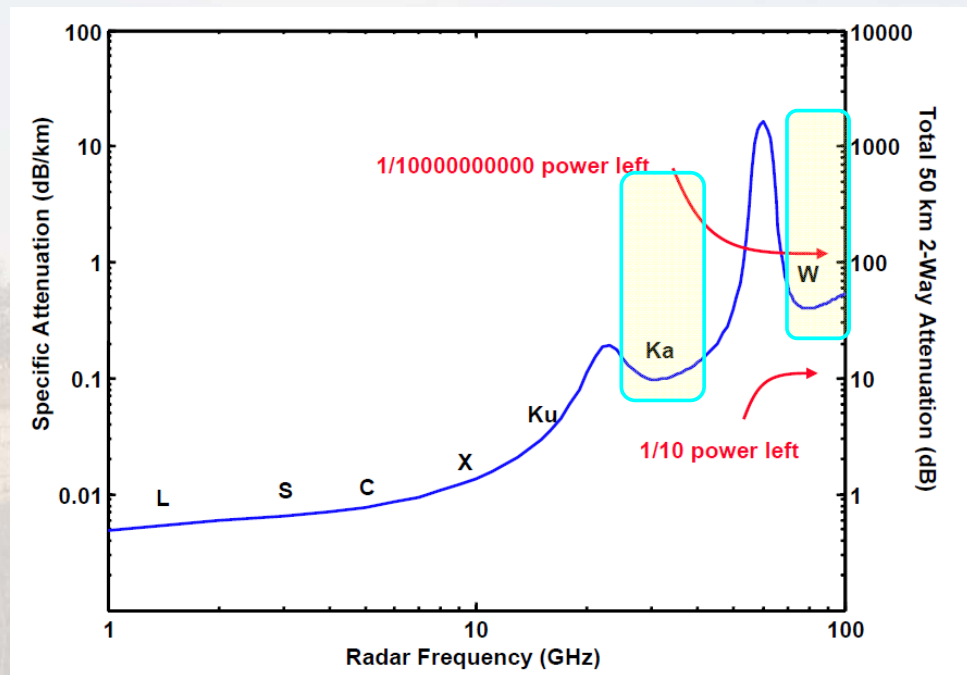
**衰减峰的展宽：**是由于分子碰撞引起的。在高空，大气稀薄时，衰减量减小且衰减峰将变窄。



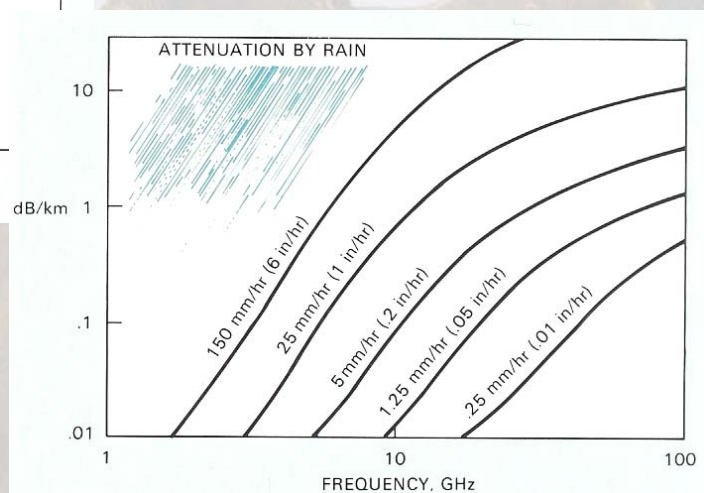
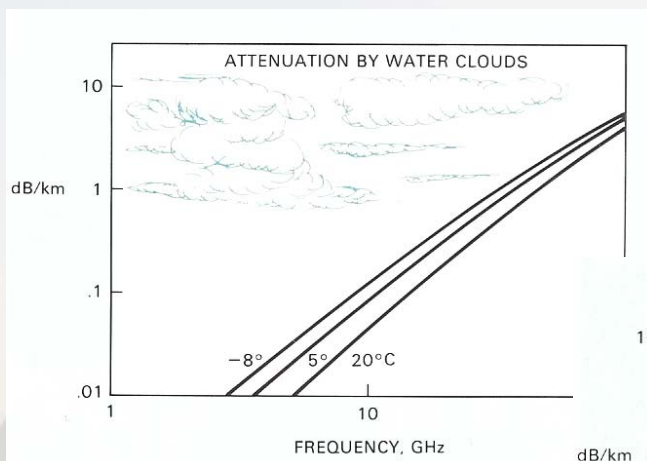
因此，较小擦地角传播将产生较大的衰减。

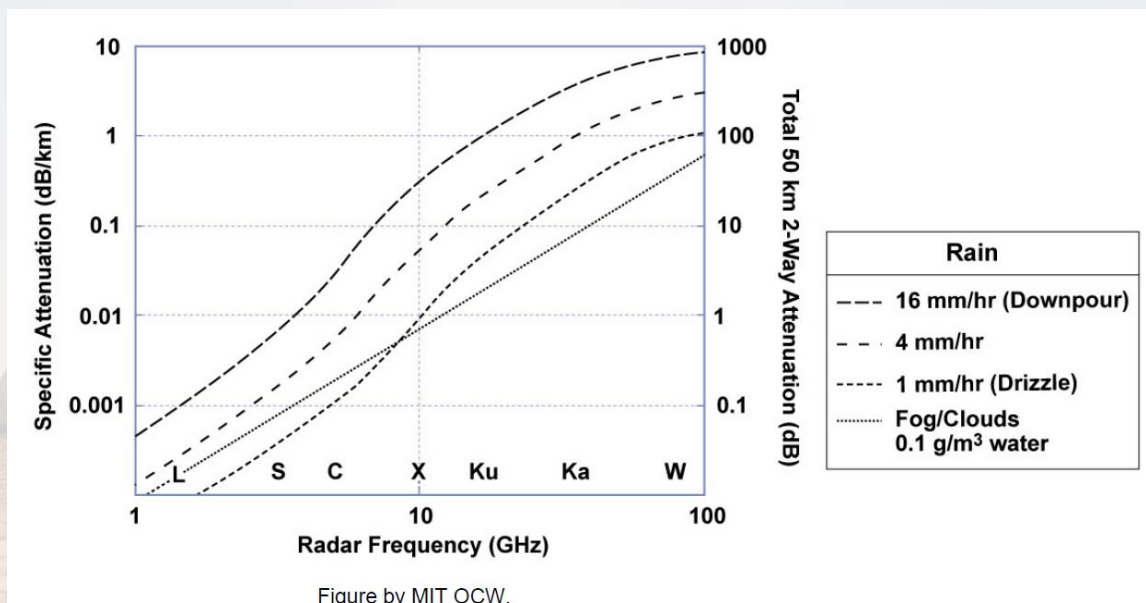


- 毫米波 (mmW) 频率窗口:  
Ka (35 GHz)  
W (95 GHz)



## 云/雾/雨的传播衰减





## 传播衰减：举例

## 雷达设计采用标准：降雨量为4 mm/hr时的传播衰减

$f$ (GHz)	波段	(dB/km, 单程)
3	S	0.0016
5	C	0.0073
10	X	0.061
16	Ku	0.19
30	Ka	0.74
100	W	3.1

# 大气折射

折射率:

$$n = \frac{c}{v_p}$$

← 真空中传播速度  
← 煤质中传播速度

$$v_{air} = \frac{c}{n_{air}}$$

$$n_{air} = 1 + \left( \frac{77.6p}{T} + \frac{(3.73 \cdot 10^5)e}{T^2} \right) \times 10^{-6}$$

式中:

$p$ =大气压 (mbar)  
 $T$ =大气温度 (Kelvin)  
 $e$ =水蒸气部分气压

中性大气的折射率: ——D. W. Blood和D. Kwan的早期大气折射模型

$$n = 1 + N \cdot 10^{-6}$$

式中:

$$N = \alpha e^{-\beta h}$$

Blood和Kwan的指数折射率模型

Profile region	Altitude range (km)	$\alpha$ (N-units)	$\beta$ (km <sup>-1</sup> )
1	0.0 to 0.3048	378.0	0.21522
2	0.3048 to 0.6096	368.58	0.13255
3	0.6096 to 0.9144	375.57	0.16339
4	0.9144 to 4.1453	374.0	0.15879
5	4.1453 to 8.9916	329.0	0.12795
6	8.9916 to 15.0266	293.0	0.11549
7	above 15.0266	780.0	0.18045



## 大气折射对雷达波的影响

大气折射对雷达波的影响主要体现在两个方面，其影响大小取决于海拔高度：

- 产生波导效应 – 使雷达“直视”距离超出地平线
- 引入仰角测量误差

两者均是由雷达波束弯曲造成的。

## 折射引起的雷达波弯曲

为什么是这样？

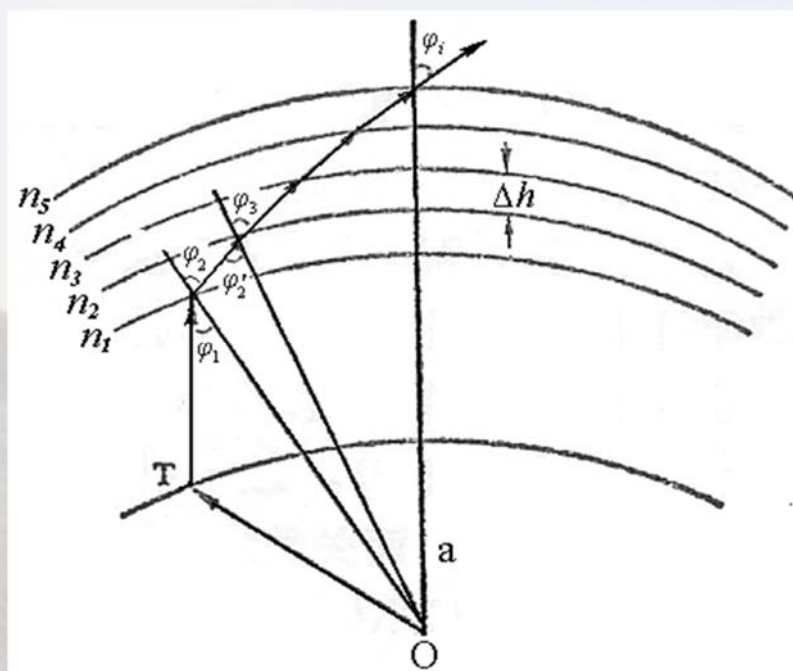
$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2$$

$$n_2 \sin \varphi'_2 = n_3 \sin \varphi_3$$

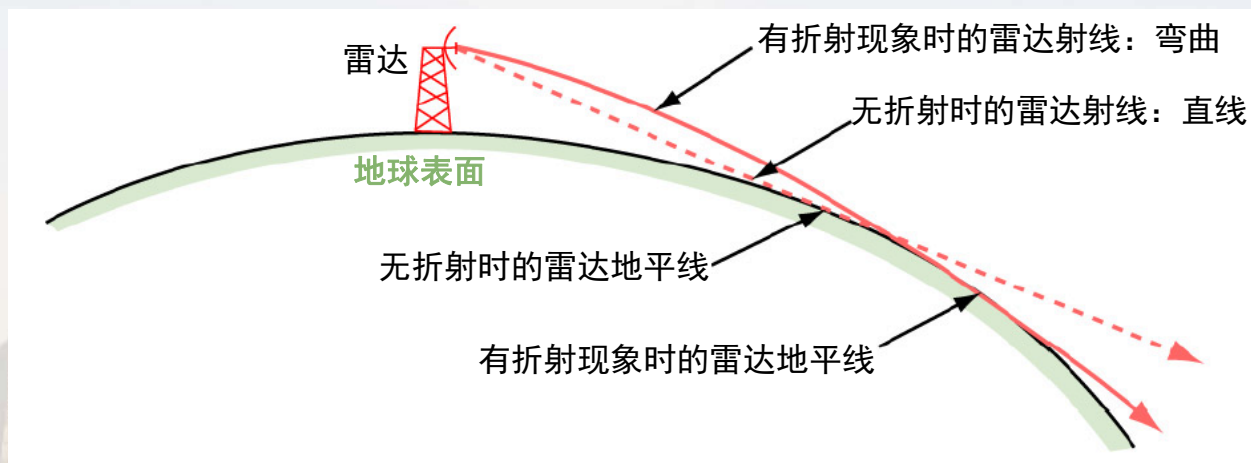
.....

$$n_{i-1} \sin \varphi'_{i-1} = n_i \sin \varphi_i$$

(折射定律)



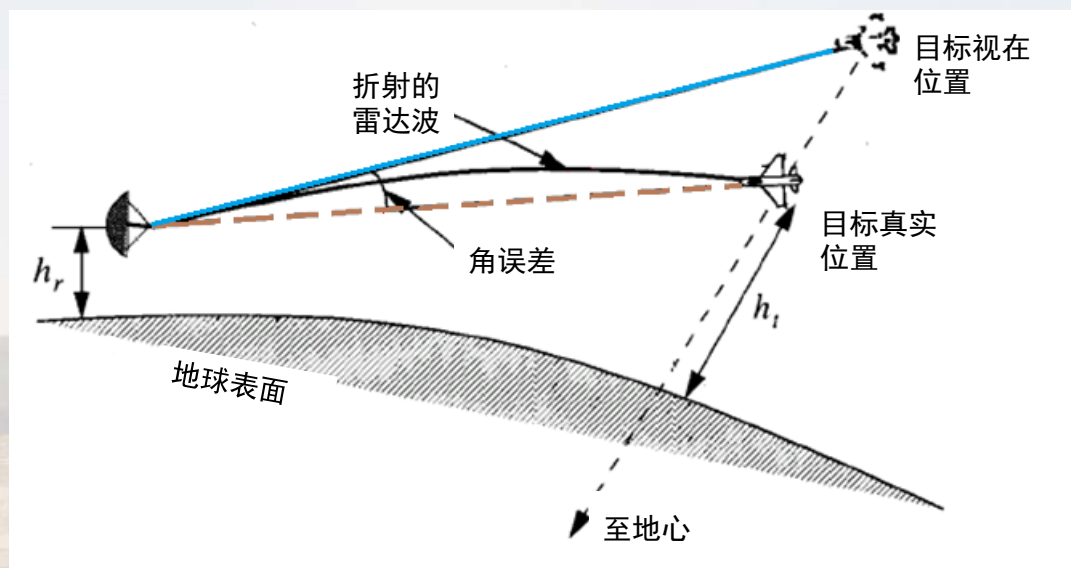
## 折射影响：波导效应



当折射率变化足够明显时，电磁波将产生射线弯曲。其结果，雷达视线可以超出地平线，称为波导效应。

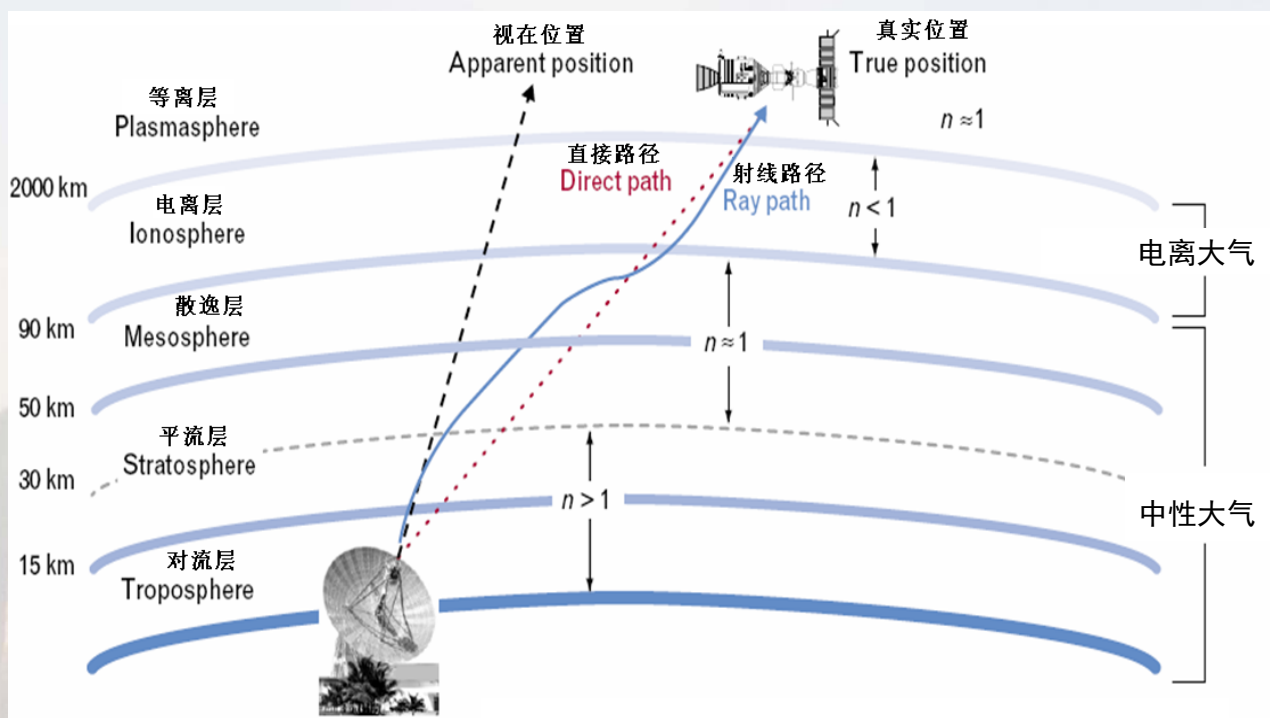
上述效应在炎热夏季的海面上尤其严重。（为什么？）

## 折射效应：仰角误差



典型地，当目标高度大于100m时，折射效应将影响仰角测量精度，进而引入目标高度测量误差。

## 地基雷达对空间目标观测中大气的影响示意图



## 第九讲 雷达系统与外部环境的相互作用

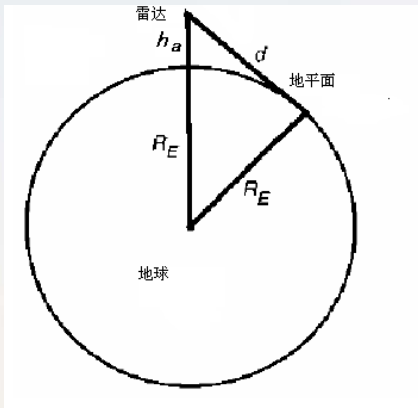
### 9.1 地球大气的影响：传播衰减和射线弯曲

### 9.2 地球表面的影响：地球曲率、粗糙表面和多径效应

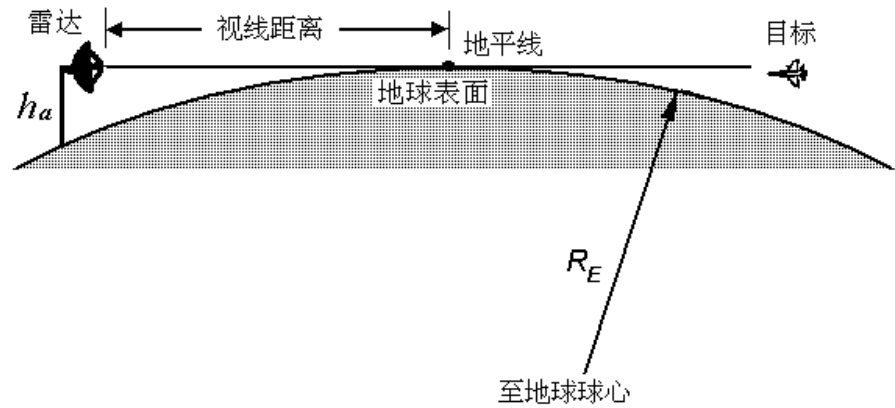
### 9.3 雷达杂波：地杂波、海杂波、体散射杂波

### 9.4 杂波的多普勒谱特性

### 9.5 杂波统计模型



## 地平线的距离



Xu: Radar Systems, Chapter-9

23

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

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

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

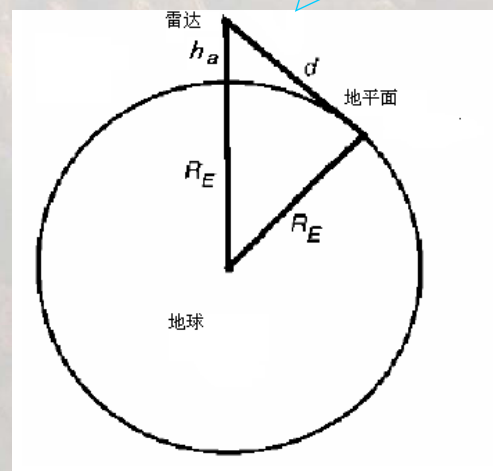
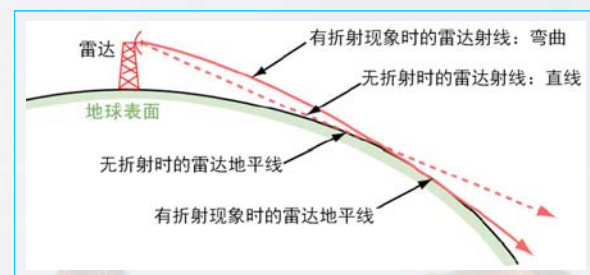


折射效应

等效地球半径:

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

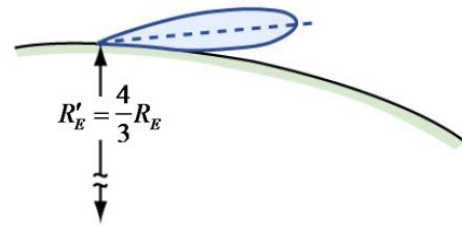
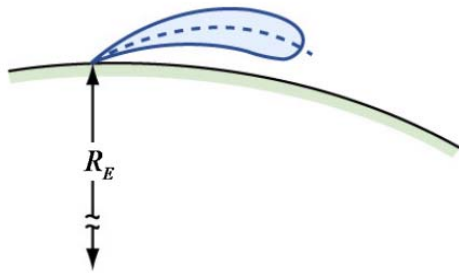
$$\alpha = \frac{1}{1 + R_E \frac{dn}{dh}}$$



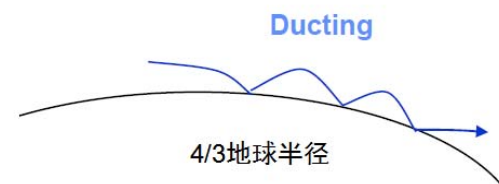
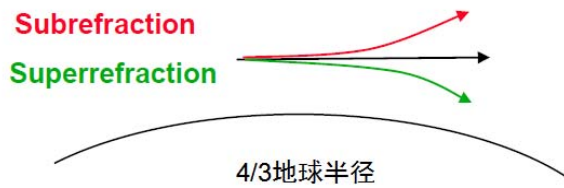
Xu: Radar Systems, Chapter-9

24





雷达计算中，大气折射造成的弯曲可用一个等效半径为真实地球半径的 $\frac{4}{3}$ 倍的“较大地球”替换。这样，在“等效地球”上，雷达射线是直的。



真实大气折射造成的影响不符合 $\frac{4}{3}$ 关系时，则造成：**Subrefraction** 或 **Superrefraction**。两者各自的影响是什么？

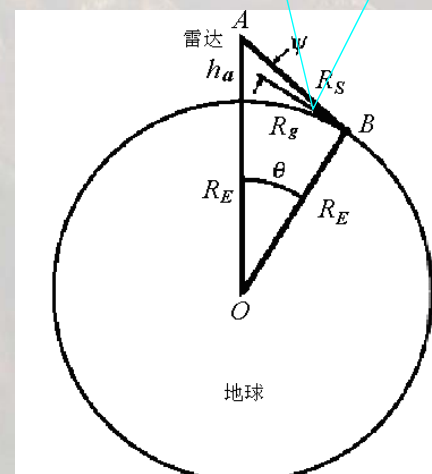
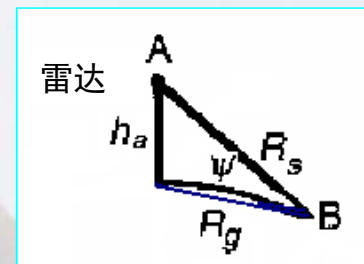
## 地面弯曲：擦地角的计算

B点的真实擦地角为：

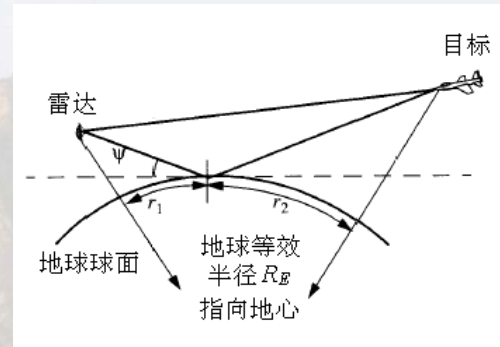
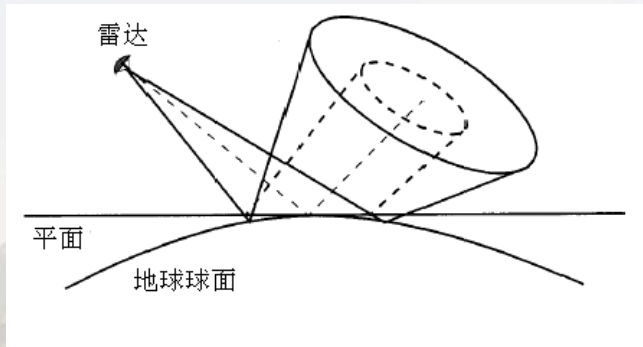
$$\psi = \angle ABO - \pi / 2$$

式中

$$\sin(\angle ABO) = \frac{(R_E + h_a) \sin \theta}{R_s}$$



## 地面弯曲导致反射的发散



发散因子:

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2r_1 r_2}{R_E (r_1 + r_2) \sin \psi}}}$$

## 光滑面与粗糙面

光滑表面:

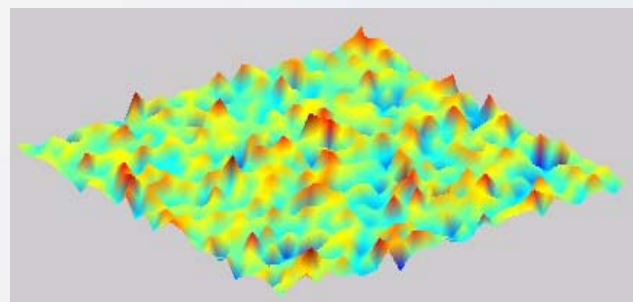
$$h \sin \psi < \frac{\lambda}{8}$$

粗糙表面:

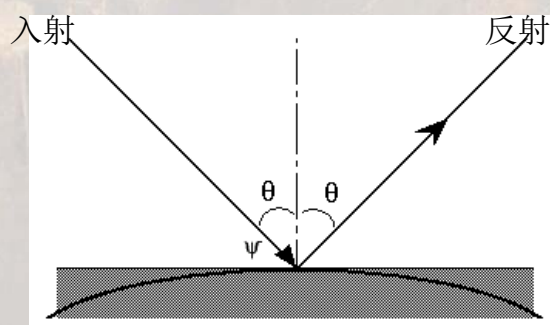
$$h \sin \psi \geq \frac{\lambda}{8}$$

对于高斯表面, 有

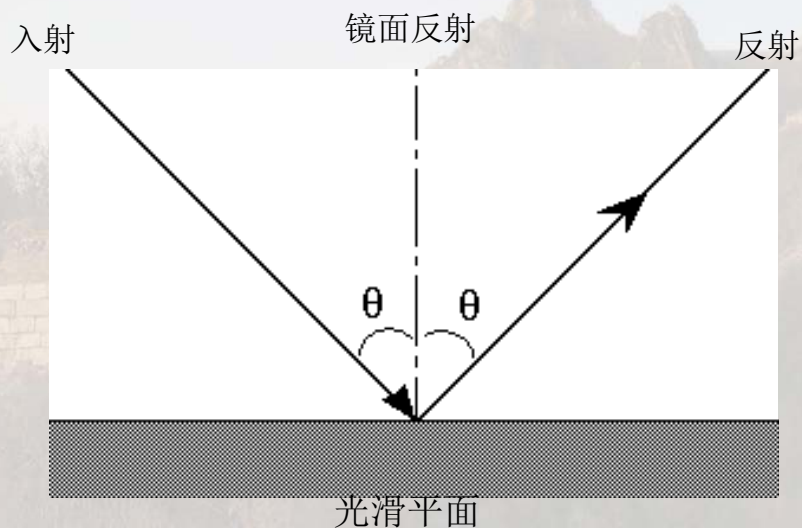
$$h = 3\sigma_h \sim 4\sigma_h$$



高斯表面

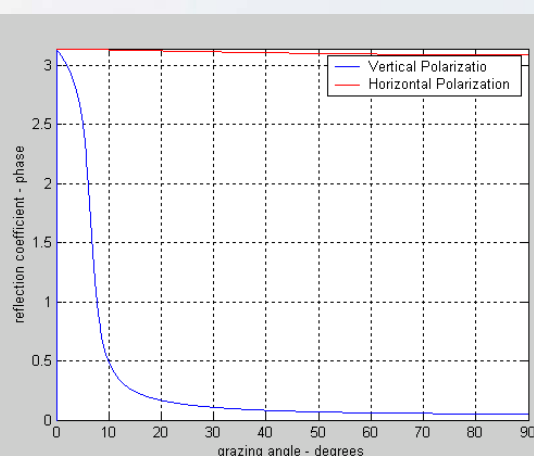
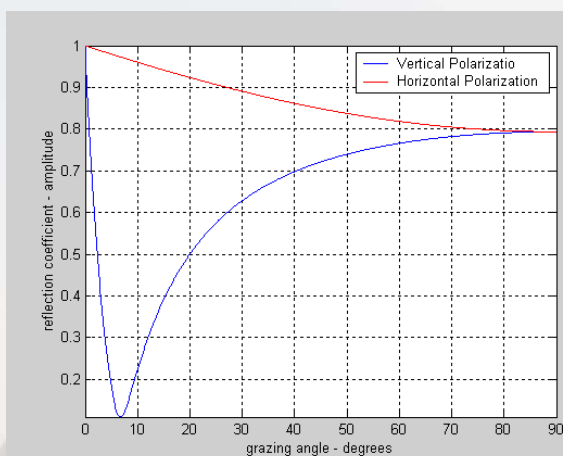


## 反射：光滑平面



遵循Snell's Law。

## 菲涅尔反射系数



$$\Gamma_V = \frac{\varepsilon \sin \psi - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \psi}}{\varepsilon \sin \psi + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \psi}}$$

$$\Gamma_H = \frac{\sin \psi - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \psi}}{\sin \psi + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \psi}}$$

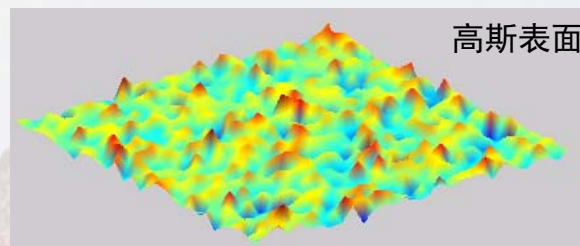
Ref.: Mahafza B. R., Radar System Analysis & Design Using MATLAB, Chapman, 2000.

## 反射：粗糙面

理想粗糙面：表面粗糙度大于雷达波长。粗糙度因子为

$$\gamma = \frac{\sigma_h \sin \psi}{\lambda}$$

$$\rho_s = \begin{cases} \exp(-8\pi^2 \gamma^2), & 0 \leq \gamma \leq 0.1 \\ \frac{0.812537}{1 + 8\pi^2 \gamma^2}, & \gamma > 0.1 \end{cases}$$



粗糙面的反射率为：

$$\Gamma_{r(H,V)} = \Gamma_{(H,V)} \cdot \rho_s$$

也有其他计算式 --Ref: Miller A.R., Proc IEE, Pt.H, 1984, pp.114-116

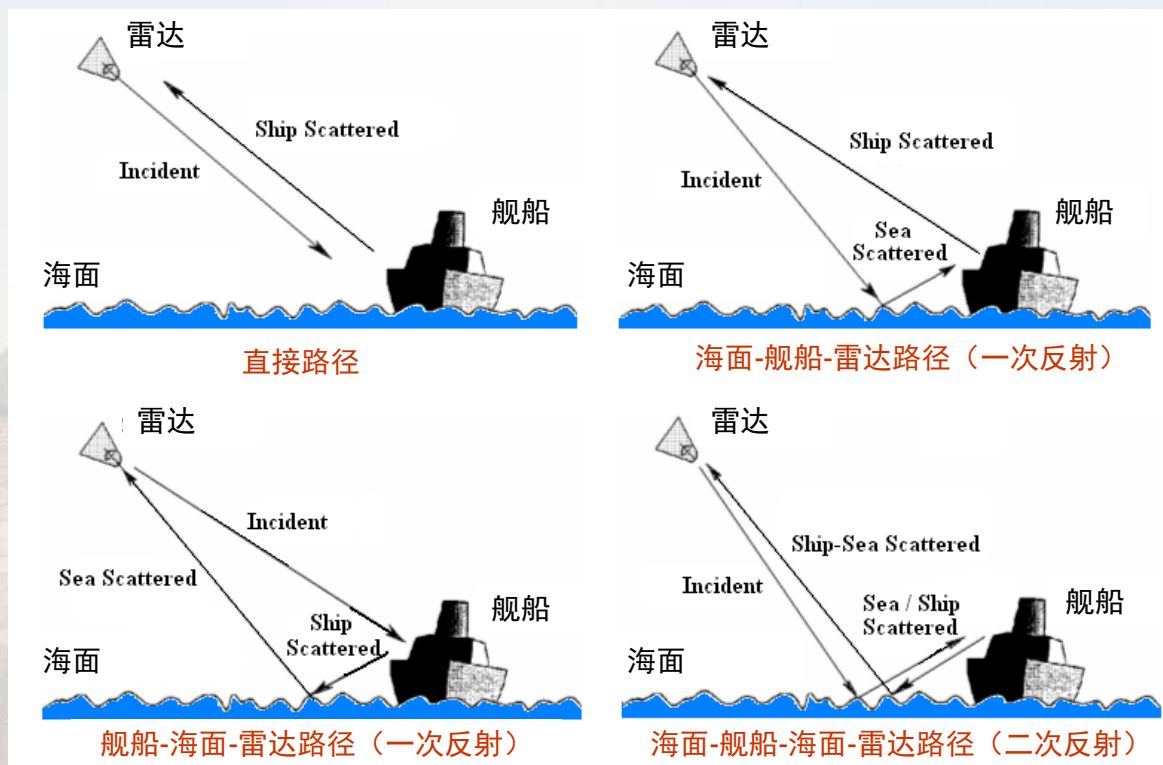
## 反射：粗糙曲面

粗糙曲面的反射率计算：同时考虑光滑表面菲涅尔反射系数、表面粗糙度因子和曲面发散因子的影响，即：

$$\Gamma_{r(H,V)} = \Gamma_{(H,V)} \cdot D \cdot \rho_s$$



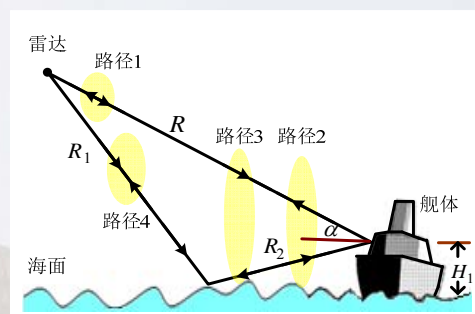
## 海面舰船目标的典型多路径散射示意图



小擦地角、风平浪静



擦地角不大、海况不大

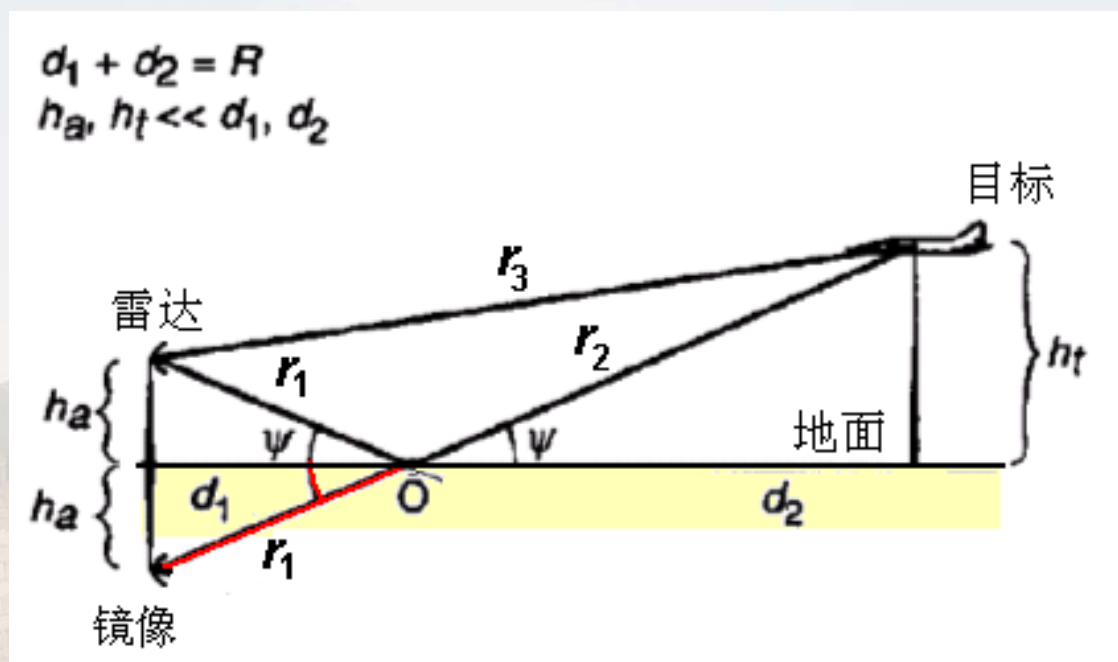
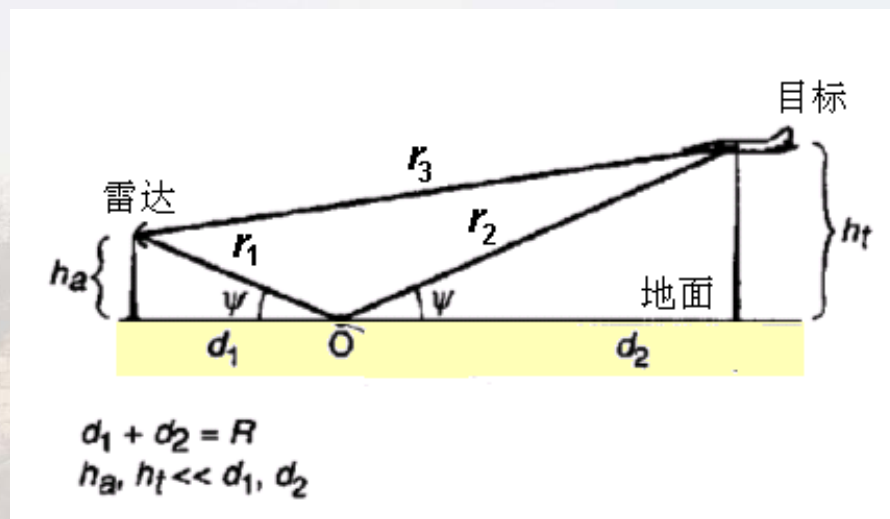


擦地角较大、海况3-4级

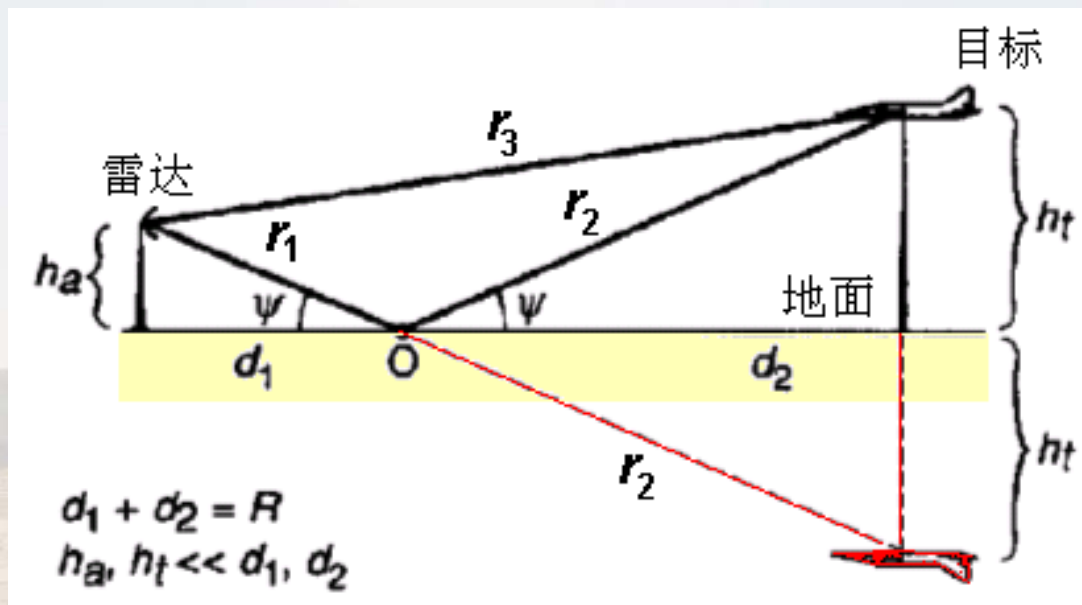


**多径散射问题：**当目标周边环境存在下垫面时，可造成多径散射

## 地面/海面上空低飞目标的多路径散射示意图

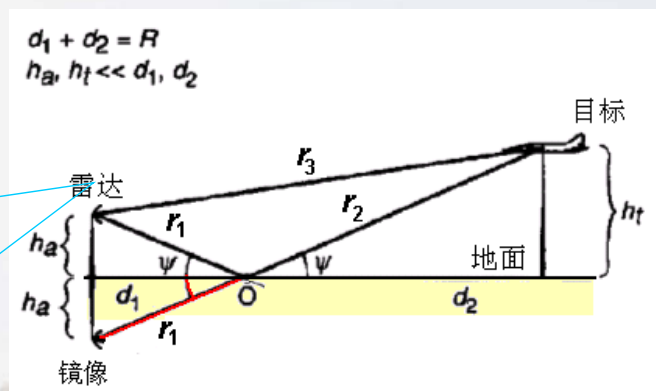
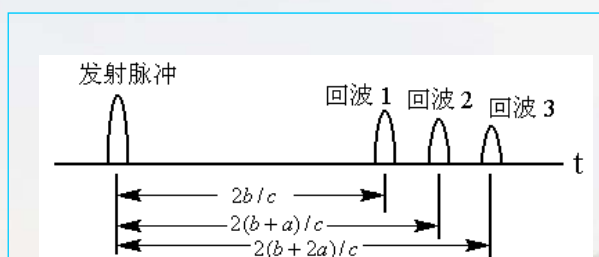


多径散射可等效为在下垫面的另一侧存在另一个  
**镜像天线**，其信号输入到相同接收机



多径散射也可等效为在下垫面的另一侧存在一个  
**镜像目标**

雷达回波:



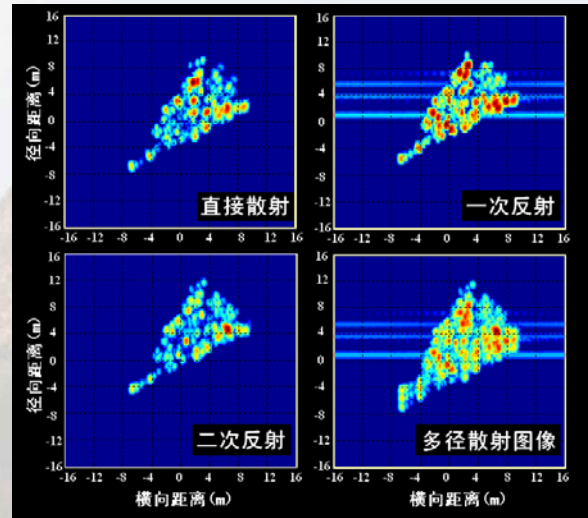
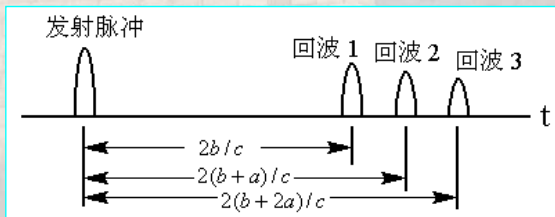
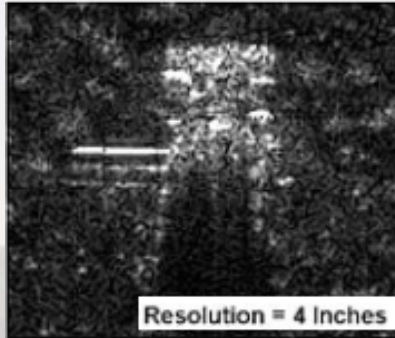
$$\vec{E}_0 = \vec{E}_{01} e^{-jkL_1} + 2\rho \vec{E}_{02} e^{-jkL_2} + \rho^2 \vec{E}_{03} e^{-jkL_3}$$

回波路径（双程）：

- 直接路径:  $L_1 = 2r_3 = 2b$
  - 一次反射路径:  $L_2 = r_1 + r_2 + r_3 = 2b + 2a$
  - 两次反射路径:  $L_3 = 2(r_1 + r_2) = 2b + 4a$
- $a = (r_1 + r_2 - r_3)/2, \quad b = r_3$



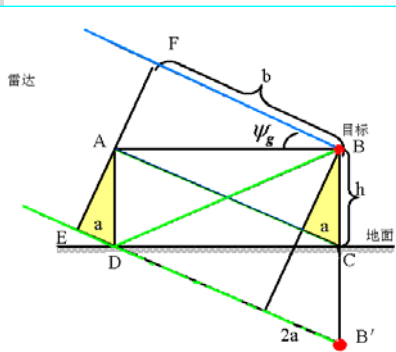
## 多径效应在SAR图像中的表现



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



Bridge signature during construction. The deck was not installed.

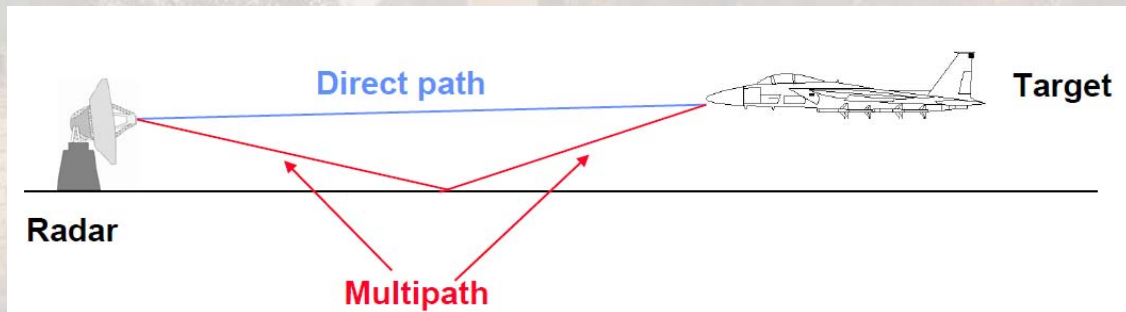
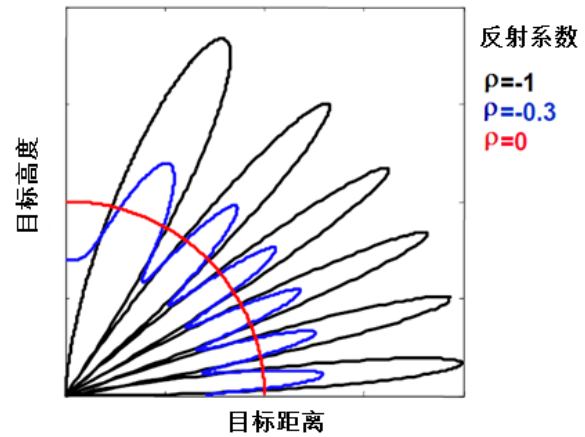


$$\vec{E}_0 = \vec{E}_{01}e^{-jkL_1} + 2\rho\vec{E}_{02}e^{-jkL_2} + \rho^2\vec{E}_{03}e^{-jkL_3}$$



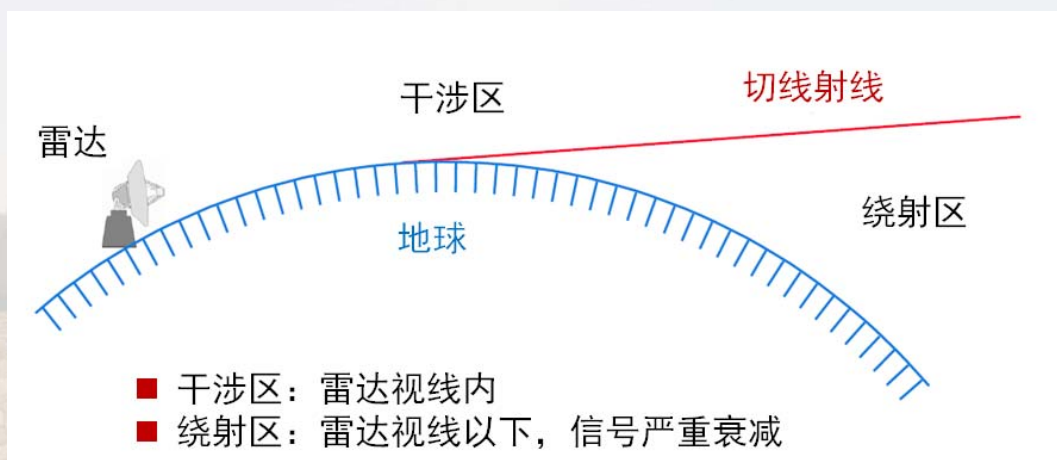
- 多径效应造成波瓣分裂
- 多径效应可使对同一目标的探测距离增大多达1倍
- 多径效应也可使雷达根本无法探测到同一目标

为什么？

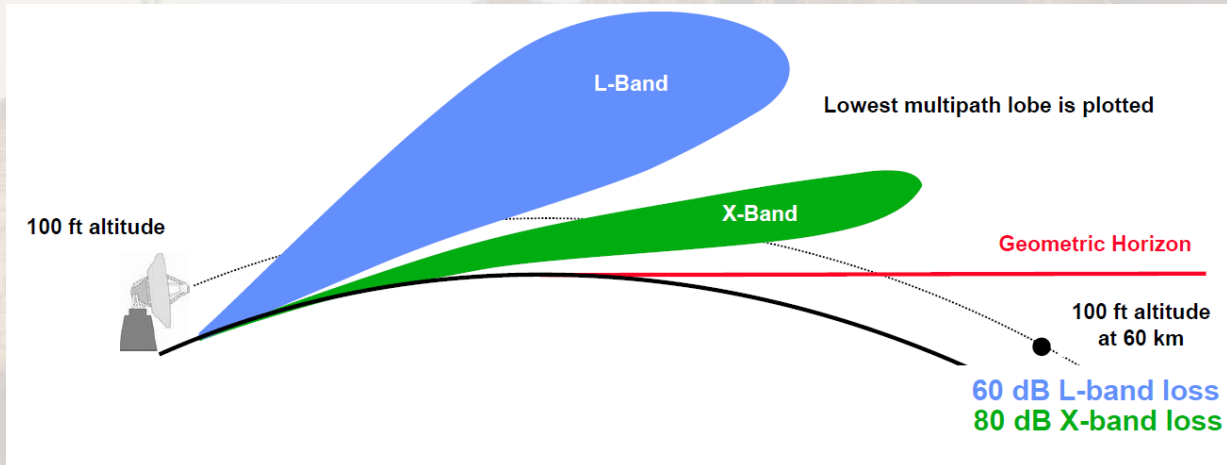
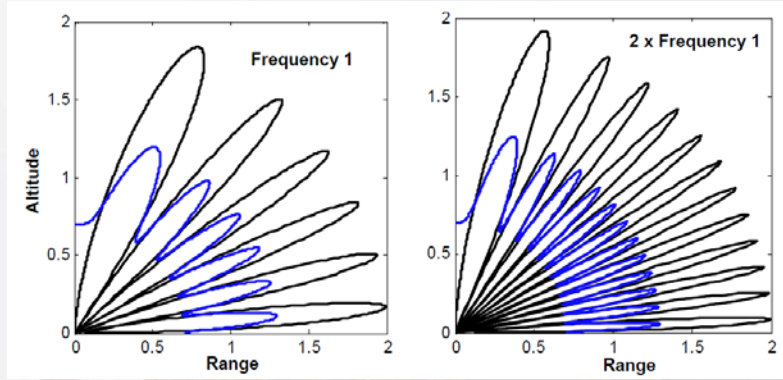


$$\vec{E}_0 = \vec{E}_{01}e^{-jkL_1} + 2\rho\vec{E}_{02}e^{-jkL_2} + \rho^2\vec{E}_{03}e^{-jkL_3}$$

## 地球表面对雷达波的绕射



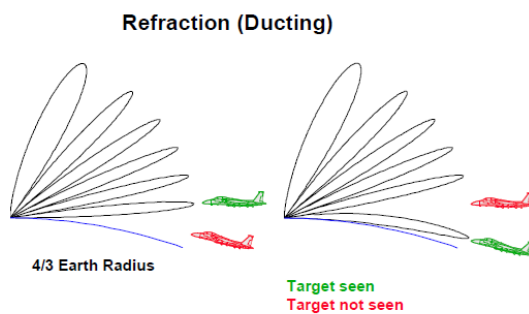
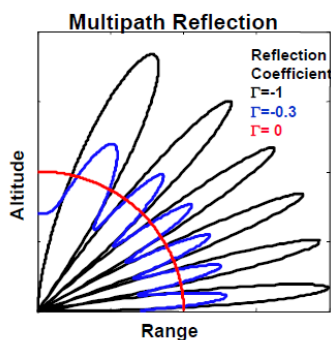
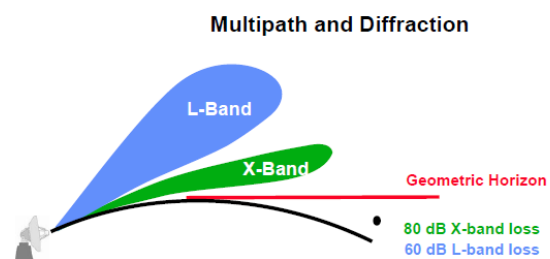
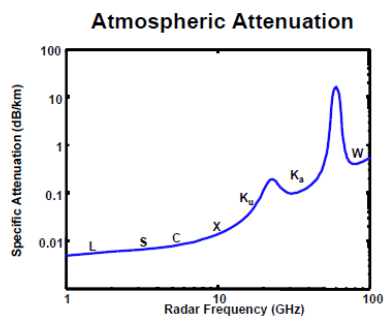
## 多径+绕射的综合影响



## 地球与大气对雷达波传播的影响：小结



### Radar Propagation Effects Summary



## 第九讲 雷达系统与外部环境的相互作用

9.1 地球大气的影响：传播衰减和射线弯曲

9.2 地球表面的影响：地球曲率、粗糙表面和多径效应

**9.3 雷达杂波：地杂波、海杂波、体散射杂波**

9.4 杂波的多普勒谱特性

9.5 杂波统计模型

## 散射系数的定义

目标RCS:

$$\sigma = \sigma^0 \cdot A$$

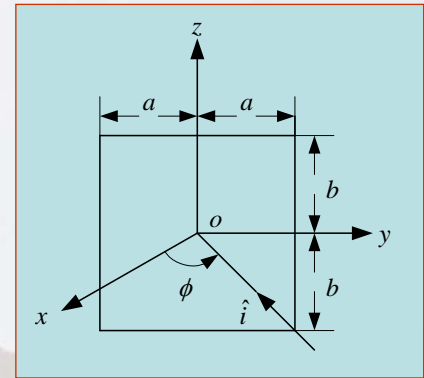
表面的散射系数：单位面积的RCS

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

注意：“散射系数”不同于前面的“反射系数”，前者可以大于1！

## 示例：金属平板的RCS

$$\sigma_{po} = \frac{64\pi}{\lambda^2} a^2 b^2 \cos^2 \phi \left[ \frac{\sin(2ka \sin \phi)}{2ka \sin \phi} \right]^2$$



在镜面反射方向,  $\phi=0$ ,

$$\sigma_{po} = \frac{4\pi}{\lambda^2} A^2$$



$$\sigma^0_{metalplate} = \frac{\sigma}{A} = \frac{4\pi}{\lambda^2} A$$

$$A = 0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$$

$$\lambda = 0.03 \text{ m (X band)}$$

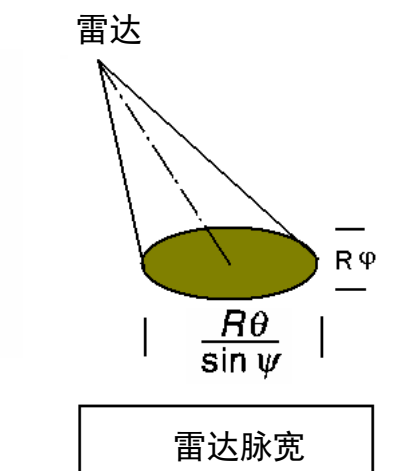
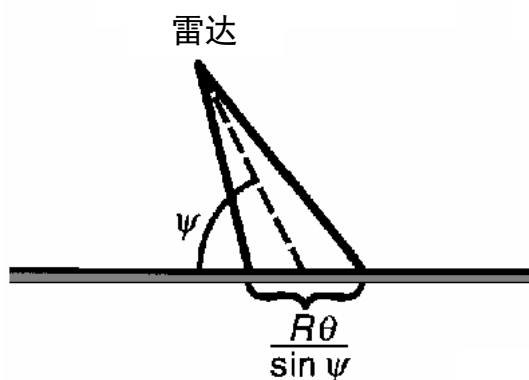
$$\sigma = \frac{4 \times 3.1416}{0.03^2} \times (0.2^2)^2 = 22.34 \text{ m}^2$$

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{A} = 558.5$$

$\gg 1$  !

## 照射面积的计算——受天线波束限制情况

一般为擦地角比较大的情况

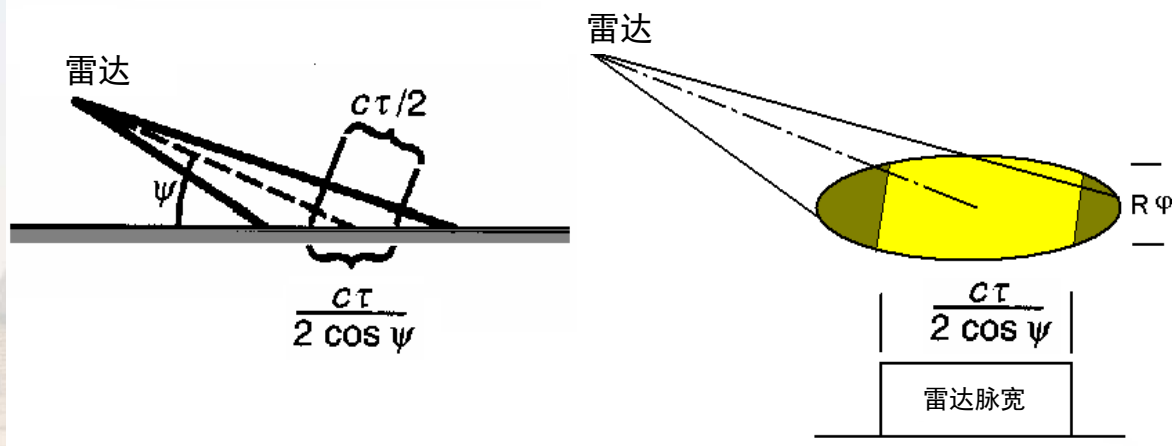


$$A \approx \frac{\pi}{4} \frac{R^2 \theta \phi}{\sin \psi}$$

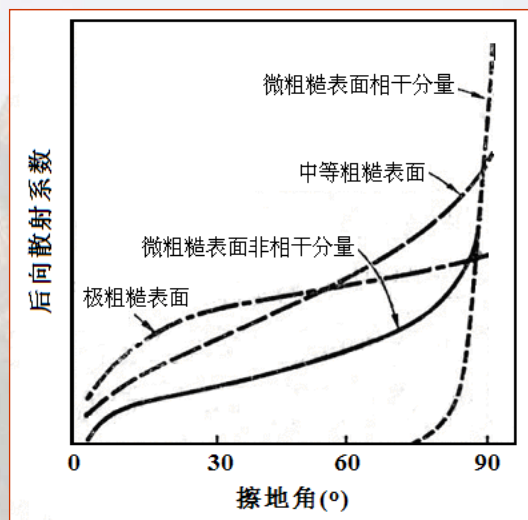
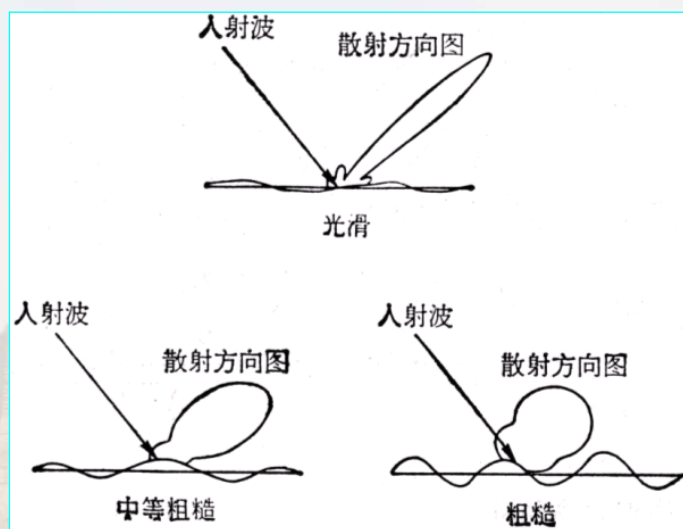


## 照射面积的计算——受脉冲波门限制情况

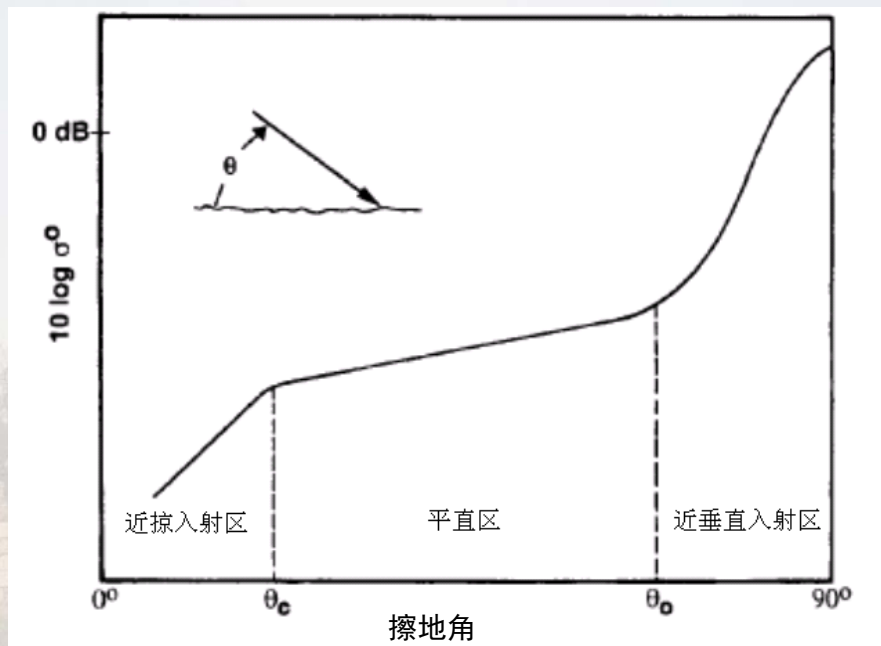
一般为擦地角比较小的情况



$$A \approx \frac{c\tau}{2 \cos \psi} R\phi$$

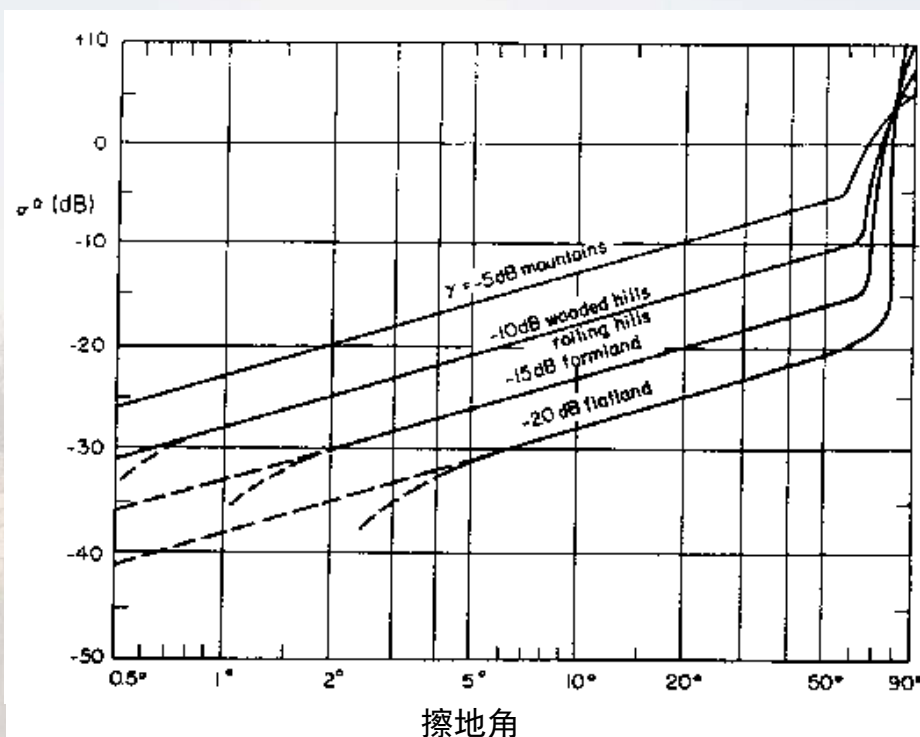


不同粗糙程度的表面散射方向特性示意图

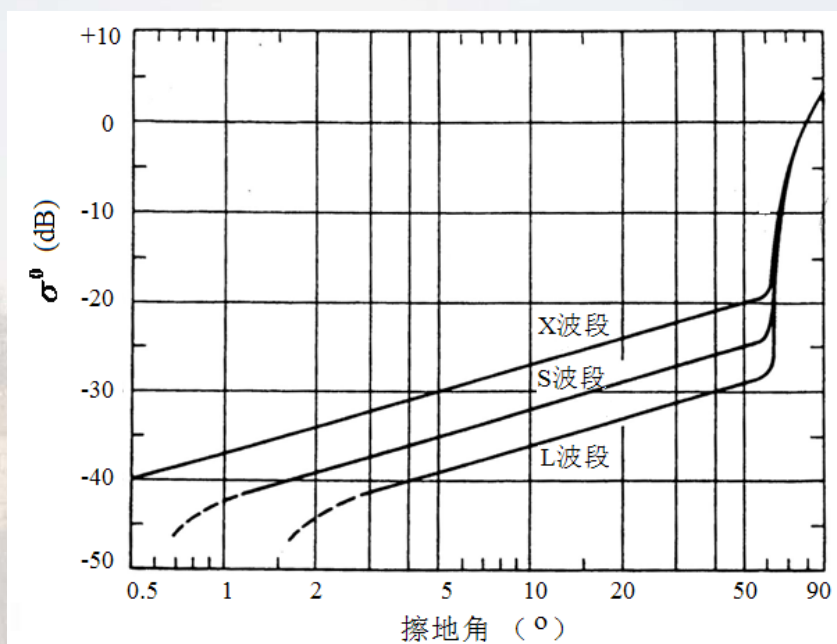


粗糙面散射随擦地角变化的一般特性

## 地杂波



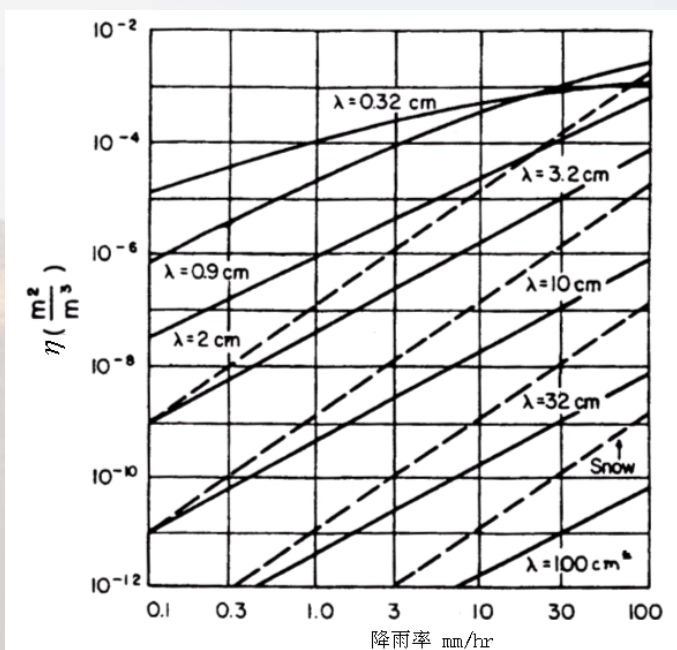
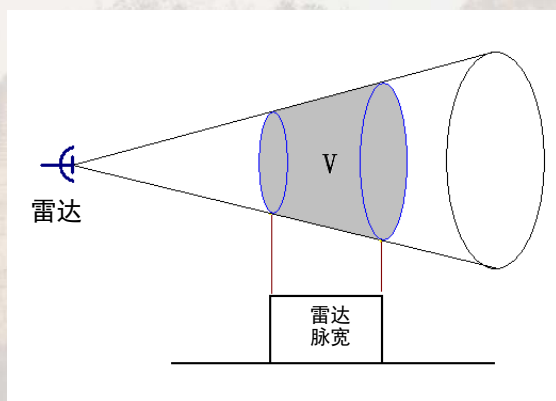
## 海杂波



## 雨、雪的体杂波

体散射系数:

$$\eta = \frac{\sigma}{V}$$



## 第九讲 雷达系统与外部环境的相互作用

9.1 地球大气的影响：传播衰减和射线弯曲

9.2 地球表面的影响：地球曲率、粗糙表面和多径效应

9.3 雷达杂波：地杂波、海杂波、体散射杂波

**9.4 杂波的多普勒谱特性**

9.5 杂波统计模型

## 既然杂波中的目标检测性能取决于回波的信杂比，为什么还要研究杂波的多普勒谱？

由于风速等原因造成像树林、海面一类环境的自身运动，将产生其雷达杂波内部调制的功率谱特性，这种**杂波的谱展宽对于动目标指示（MTI）等雷达的杂波改善因子具有极其重要的影响。**



## 运动点目标的回波：

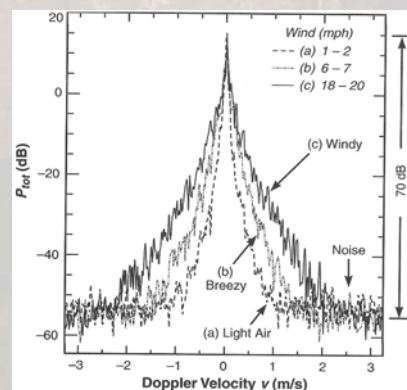
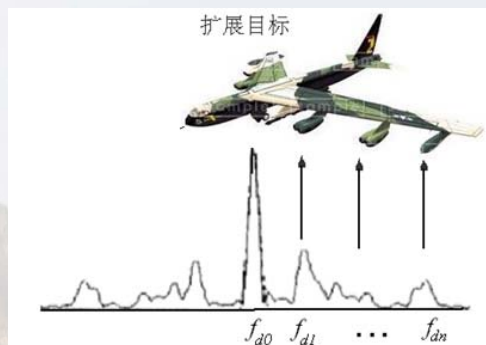
$$s_d(t) = A_d \cos(2\pi f_d t - \frac{4\pi R_0}{\lambda})$$

## 运动扩展目标的回波：

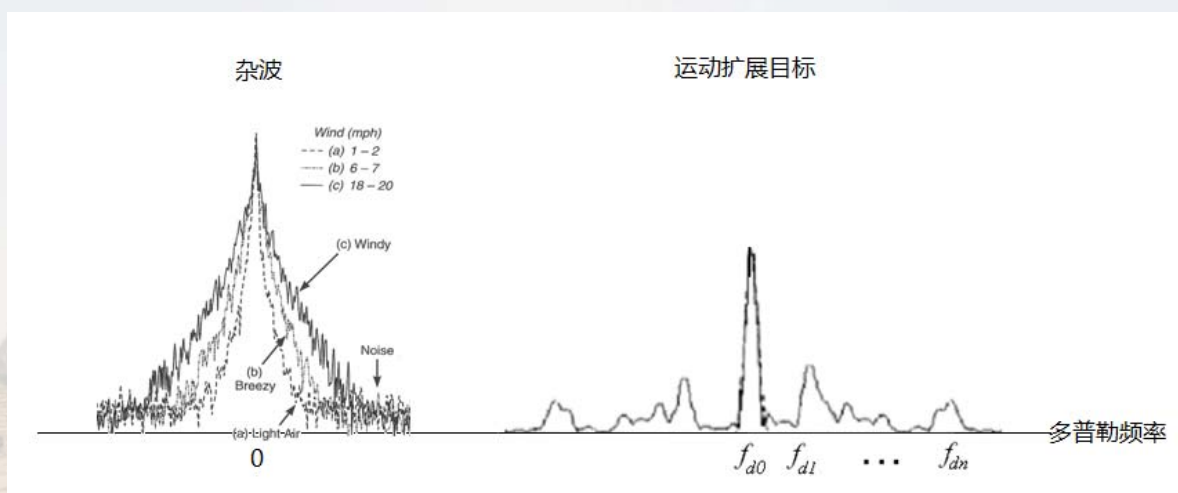
$$s_d(t) = \sum_k A_{dk} \cos[2\pi f_{dk} t - \frac{4\pi}{\lambda} (R_0 + r_k)]$$

## 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。

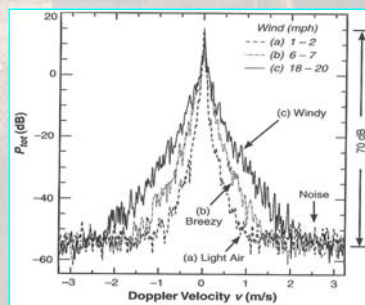
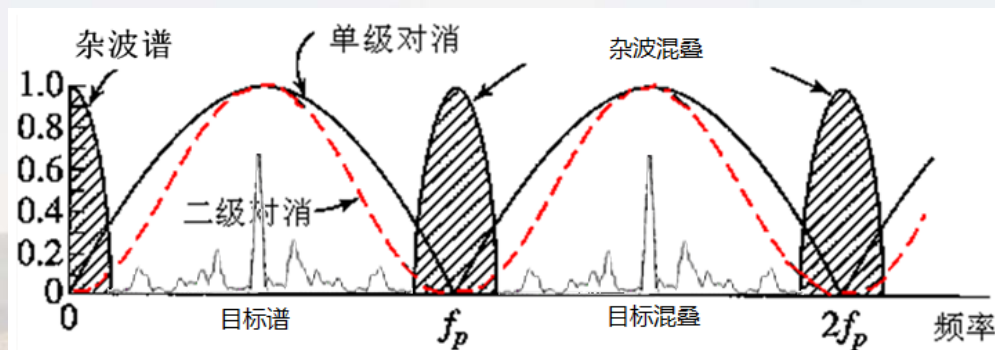


## 目标与杂波之间的可分离性



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，但其有效性既取决于目标运动速度的快慢，也强烈地取决于杂波的多普勒谱分布特性。

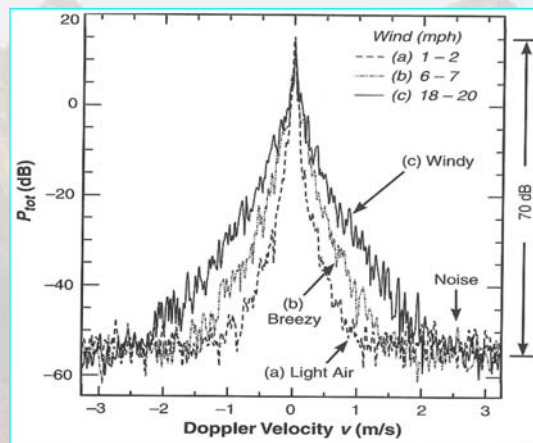
# MTI 雷达的杂波对消滤波处理 (延时线对消器)



真实杂波谱在很大程度上决定了滤波器的参数设计。

用于描述杂波的这种多普勒调制谱特性的模型主要有三个，即：

- 高斯频谱模型
- 幂次律 (Power-Law) 模型
- 指数律模型



# 高斯谱模型

**高斯谱模型**假设杂波的功率谱密度符合以下高斯函数，即

$$W(f) = W_0 e^{-\frac{f^2}{2\sigma_c^2}} = W_0 e^{-\frac{f^2 \lambda^2}{8\sigma_v^2}}$$

式中

$W_0$  为杂波功率谱密度在  $f = 0$  处的峰值；

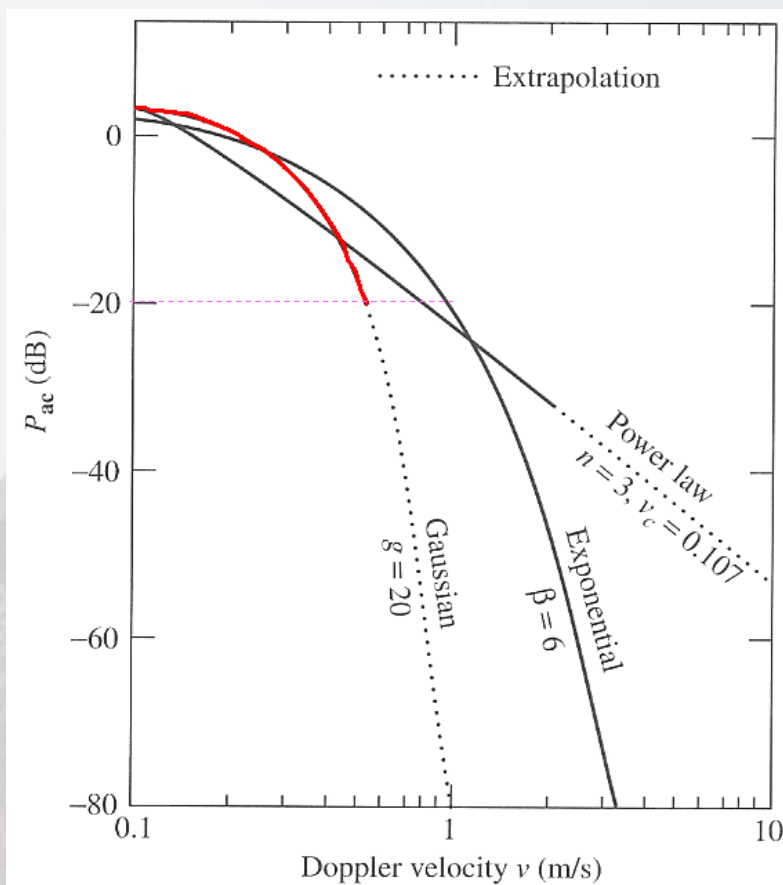
$\sigma_c$  为以Hz（频率）为单位的杂波谱标准偏差；

$\sigma_v$  为以m/s（速度）为单位的杂波谱标准偏差，有

$$\sigma_c = \frac{2\sigma_v}{\lambda}$$

**高斯模型是最早提出来的模型，它具有数学上的简洁性。**

但是，随着雷达灵敏度的提高，人们发现杂波功率谱随着频率的升高，其衰减幅度并不如高斯模型所预测的那样快，在杂波功率谱低于零多普勒峰值15~20dB附近开始，高斯模型**衰减过快**，不再精确。



# 幂次律 (Power-Law) 模型

因此，人们提出了**Power-Law模型**：

$$P(f) = \frac{1}{1 + (f / f_c)^n}$$

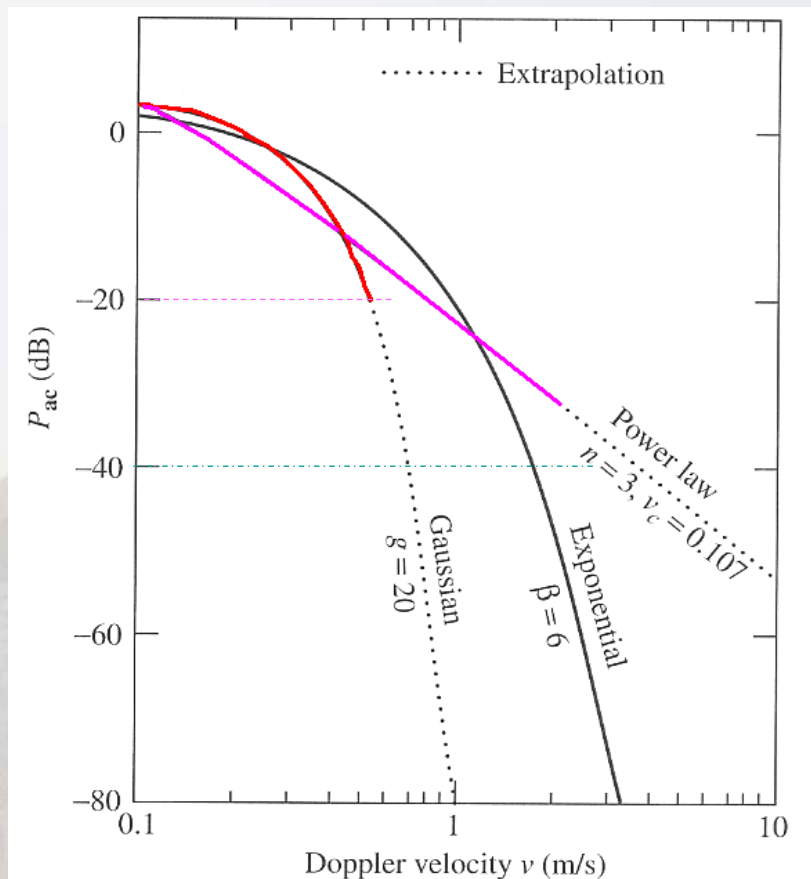
$f_c$  为杂波频谱的特征频率，它定义为杂波谱密度下降到其零多普勒峰值的1/2时的频率点，

$$f_c = k_1 \exp\{k_2 V\}$$

$$k_1 = 1.33, k_2 = 0.1356$$

$V$  为风速（单位为节，knot, 1 knot = 1.852 km/hr. ）。

研究表明，当杂波谱密度值进一步下降到低于零频峰值40dB左右时，幂次律模型所预测的杂波谱密度**衰减过慢**。





## 指数律模型

因此，MIT林肯实验室的Billingsley提出了**指数律模型**：

$$P_{tot}(v) = \frac{r}{r+1} \delta(v) + \frac{1}{r+1} P_{av}(v)$$

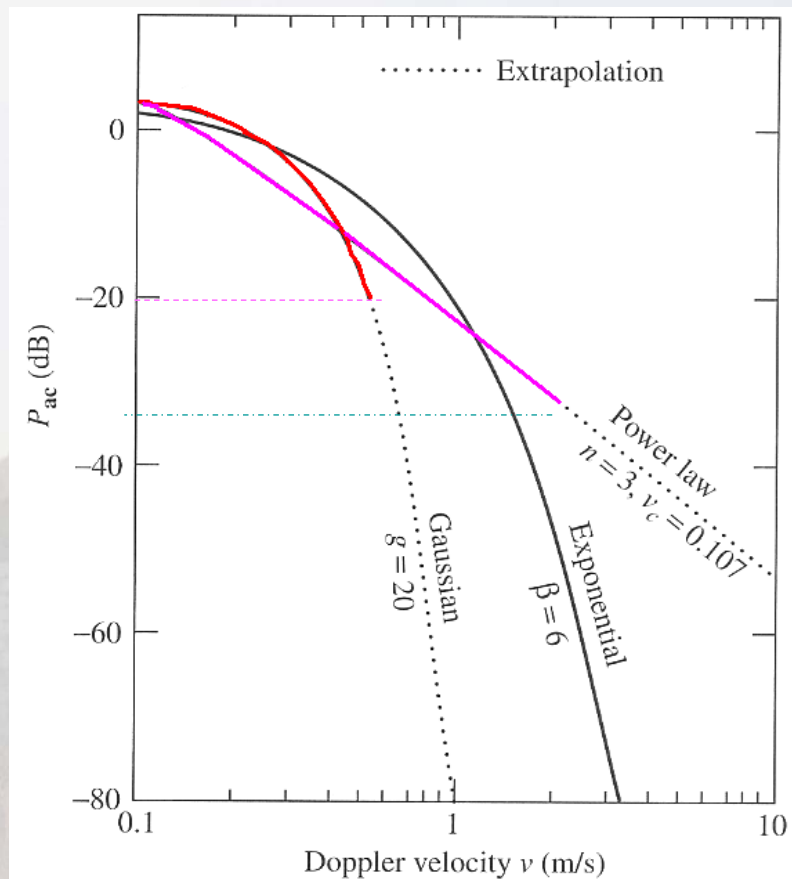
$$P_{av}(v) = \frac{\beta}{2} \exp\{-\beta|v|\},$$

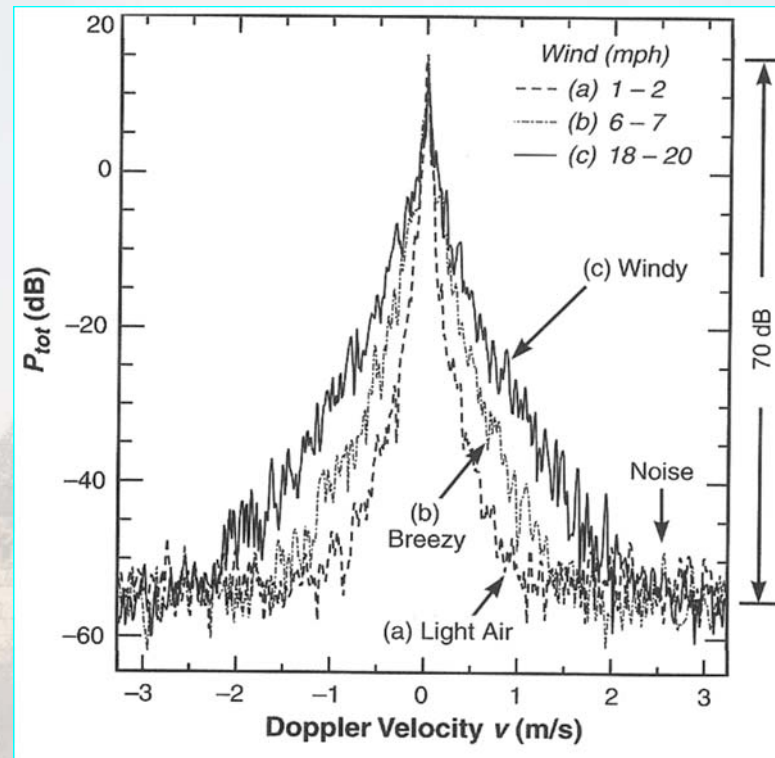
$$\beta = \frac{1}{0.105(\log_{10} V + 0.476)}$$

$$r = 394V^{-1.55} f_0^{-1.21}$$

式中 $v$ 为多普勒速度；风速 $V$ 的单位为节，频率 $f_0$ 的单位为 GHz 。

### 三种杂波频谱解析 模型的比较





树林杂波多普勒谱随风速的变化特性

## 第九讲 雷达系统与外部环境的相互作用

9.1 地球大气的影响：传播衰减和射线弯曲

9.2 地球表面的影响：地球曲率、粗糙表面和多径效应

9.3 雷达杂波：地杂波、海杂波、体散射杂波

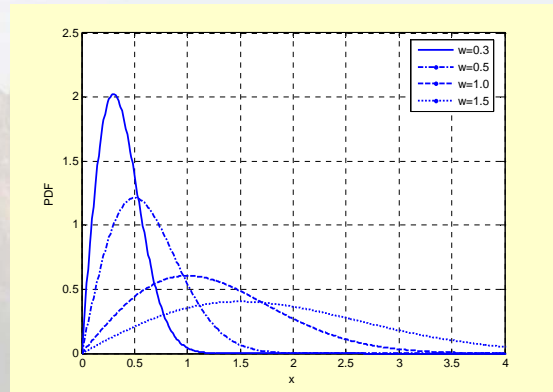
9.4 杂波的多普勒谱特性

**9.5 杂波统计模型**

## 瑞利 (Rayleigh) 分布模型

**瑞利散射机理：**大量散射点的叠加，且其中没有其主导作用的强散射源存在。

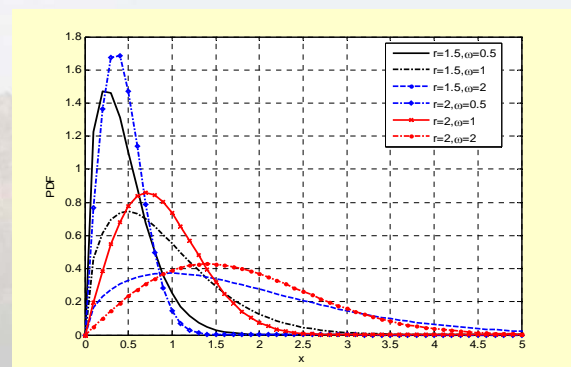
- 具有瑞利分布的杂波其回波信号的两个正交分量为**联合高斯分布**。
- 当**雷达分辨单元远大于地物起伏尺度或海浪波长**、或是**雷达波束擦地角大于 $10^\circ$** 时，根据面目标电磁散射机理和中心极限定理可知，在宏观尺度上杂波幅度大致满足瑞利分布。因此，在早期的地海杂波测量中，雷达距离分辨率较低，单个分辨单元内的散射点个数很多，根据中心极限定理，可认为杂波幅度**服从瑞利分布**。
- 随着**雷达分辨率的提高**、或是当雷达波束**擦地角较小时**，杂波幅度统计分布的“**拖尾**”会明显加重，杂波信号标准偏差与均值的比值也随之增大，这表明杂波的真实统计分布已经明显**偏离瑞利分布**。
- 若此时仍然采用基于瑞利分布模型的匹配滤波等信号处理算法，雷达虚警概率将显著增大。因此**须采用非高斯概率分布函数**来对雷达杂波建模。



## 韦布尔 (Weibull) 分布模型

基于对**地杂波**长期、大量测量数据的处理结果，Billingsley指出：在**低擦地角**条件下，韦布尔分布可以很好地用于雷达地杂波的统计建模。韦布尔模型具有以下优点：

- 韦布尔模型是一种简单的**双参数分布**，可以适用于低擦地角下杂波空间幅度统计中常常发生的统计直方图拖尾情况；
- 在多数情况下（尽管存在例外），韦布尔分布可以**比对数正态分布、K分布更好地拟合测量数据的统计直方图**；
- 同对数正态和K分布模型相比，韦布尔分布模型的**解析表达式更加简单和易于处理**；
- 当杂波功率符合形状参数为 $r$ 的韦布尔分布时，若转换成杂波电压量统计，则其仍然满足形状参数为 $r/2$ 的韦布尔分布；
- 随着**形状参数的减小**，韦布尔分布的**概率密度拖尾也随之减小**，并在 $r=2$ 时**退化为瑞利分布**（此时，功率统计为指数分布，电压统计为瑞利分布）。这种变化特性与雷达观测中增大擦地角和分辨单元尺寸时，概率密度拖尾变小、且在大擦地角时均匀地杂波符合瑞利分布的现象相一致。



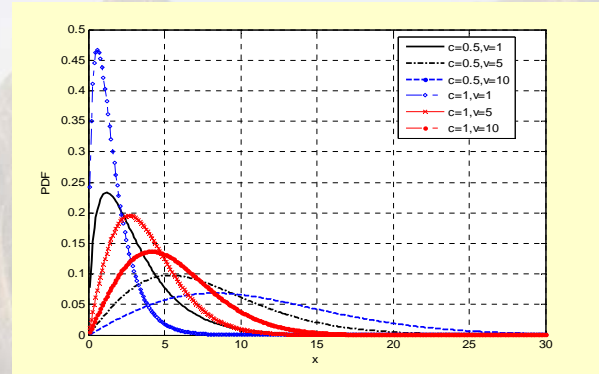


## 复合K分布模型

**复合K分布散射机理：**由慢变化量（符合Gamma分布，纹理调制分量）和快变化量（服从瑞利分布，散斑分量）两个分量构成，符合该分布的杂波幅度可以表示为这两个相互独立的随机变量的乘积。

□ 复合K分布适用于描述**高分辨率雷达的非均匀杂波**，多见用于对**海杂波描述**，是目前能较好地反映雷达杂波特性的概率模型之一。

□ 复合K分布则对于海面的物理散射机理具有很好的解释，并可以严格地从数学上推导得到，同时与试验测量数据也吻合得很好，它不仅描述了杂波的幅度统计分布特性，还有效地表征了杂波的相关特性。



□ 此外，K分布的一个最大优点是能够利用球不变随机过程来很容易地独立处理**时域和空域相关特性**，这种时域和空域二维相关特性对于现代雷达中的空-时自适应信号处理(STAP)等至关重要，因此受到了普遍的重视，并在海杂波的统计建模中得到广泛应用。

## 其他统计模型

**对数-正态分布模型：**适合于处理概率密度函数具有极强拖尾的杂波。

**KK分布和KA分布模型：**这两者将**海尖峰**加入到了模型中，以很好描述具有尖峰现象的海杂波统计分布曲线。但KK分布和KA分布模型数学形式复杂，实际应用中多有不便。

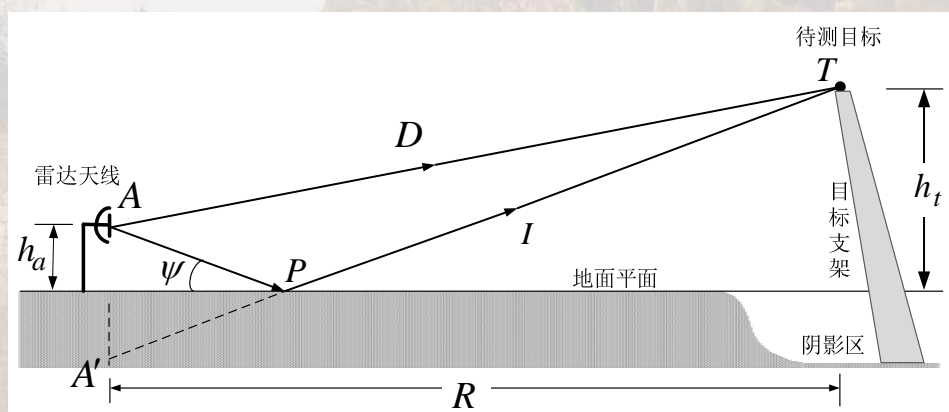
**Pareto分布模型：**近年来逐渐被广泛地应用于海杂波统计分布特性描述中，它相较于K分布有**更长的拖尾**，与实际海杂波的统计分布曲线吻合更好。Pareto分布不仅能够同时很好地描述**大、小擦地角下的海杂波统计分布特性**，且其不需要引入额外的分量，数学形式简单，在海杂波统计分布特性描述和建模中具有优势。



## 思考题

试详细推导RCS地面平面场条件式(7-29)：

$$h_a \cdot h_t = m \cdot \frac{\lambda}{4} R$$



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