

北京航空航天大学研究生院 《现代雷达系统理论》

第2讲 雷达基础

北京航空航天大学电子信息工程学院 许小剑
2020年秋季学期

Xu: Radar Systems, Chapter-02

第2讲 雷达基础

- 2.1 雷达信号：基本概念
- 2.2 脉冲波形及其频谱特性
- 2.3 Maxwell 方程与边界条件
- 2.4 球面波和平面波概念
- 2.5 电磁波的极化
- 2.6 平面波的反射、折射、绕射和散射

Xu: Radar Systems, Chapter-02

第2讲 雷达基础

2.1 雷达信号：基本概念

2.2 脉冲波形及其频谱特性

2.3 Maxwell 方程与边界条件

2.4 球面波和平面波概念

2.5 电磁波的极化

2.6 平面波的反射、折射、绕射和散射

带限(band-limited) 信号的不同表示方式

(1) 幅度与相位 (Amplitude & Phase) 表示

$$s(t) = A(t) \cos[\omega_0 t + \phi(t)]$$

$A(t)$ ：自然包络 (natural envelop)

如果是 $s(t)$ 是随机高斯噪声信号，则：

$A(t)$ 服从瑞利分布

$\phi(t)$ 服从均匀分布

(2) 复数信号 (Complex) 表示

$$s(t) = \text{Re}\{u(t)e^{j\omega_0 t}\}$$

$$u(t) = A_I(t) + jA_Q(t) \quad \text{复包络(complex envelop)}$$

$$A_I(t) = A(t) \cos \phi(t) \quad \text{同相分量(I)}$$

$$A_Q(t) = A(t) \sin \phi(t) \quad \text{正交分量(Q)}$$

$$A(t) = |u(t)| = \sqrt{A_I^2(t) + A_Q^2(t)}$$

$$\phi(t) = \tan^{-1} \frac{A_Q(t)}{A_I(t)}$$

常常直接写为: $s(t) = u(t)e^{j\omega_0 t}$

(3) 同相与正交相位 (In-Phase & Quadrature) 表示

$$s(t) = \text{Re}\{u(t)e^{j\omega_0 t}\}$$



$$s(t) = A_I(t) \cos \omega_0 t - A_Q(t) \sin \omega_0 t$$

$$A_I(t) = A(t) \cos \phi(t) \quad \text{同相分量(I)}$$

$$A_Q(t) = A(t) \sin \phi(t) \quad \text{正交分量(Q)}$$

(4) 解析信号 (Analytic) 表示

$$s(t) = \frac{1}{2} [u(t)e^{j\omega_0 t} + u^*(t)e^{-j\omega_0 t}]$$

有以下关系：

$$u(t) = A_I(t) + jA_Q(t)$$

$$A(t) = |u(t)| = \sqrt{A_I^2(t) + A_Q^2(t)}$$

$$\phi(t) = \tan^{-1} \frac{A_Q(t)}{A_I(t)}$$

(它反映了复信号的实部与虚部之间满足Hilbert变换关系的本质)

电压、功率与能量

在本课程中，对于雷达信号 $s(t)$ ，不加说明地简记为

$$\text{电压} = s(t)$$

$$\text{功率} = |s(t)|^2$$

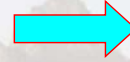
$$\text{能量 (E)} = \int_{-\infty}^{\infty} |s(t)|^2 dt$$

尽管不严谨，但不至于出现混淆。

信号及其傅里叶变换

以角频率 ω 表示：

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt$$



$$s(t) \Leftrightarrow S(\omega)$$

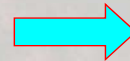
$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$



$$\omega = 2\pi f$$

以空间频率 f 表示：

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt$$



$$s(t) \Leftrightarrow S(f)$$

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) e^{j2\pi ft} df$$

(式中 2π 常数通常可能被忽略!)

卷积关系:

$$s_1(t) * s_2(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_1(\tau) s_2(t - \tau) d\tau$$

有

$$s_1(t) * s_2(t) \Leftrightarrow S_1(f) \cdot S_2(f)$$

和

$$s_1(t) \cdot s_2(t) \Leftrightarrow S_1(f) * S_2(f)$$

第2讲 雷达基础

2.1 雷达信号：基本概念

2.2 脉冲波形及其频谱特性

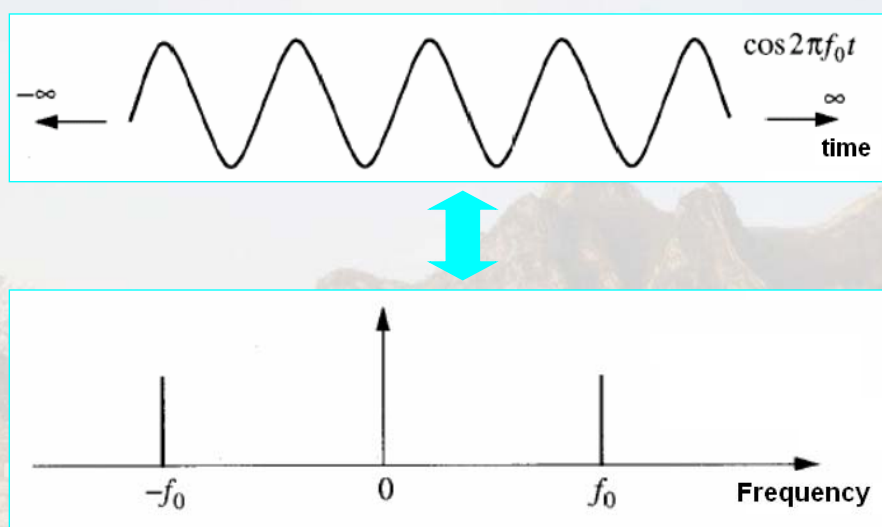
2.3 Maxwell 方程与边界条件

2.4 球面波和平面波概念

2.5 电磁波的极化

2.6 平面波的反射、折射、绕射和散射

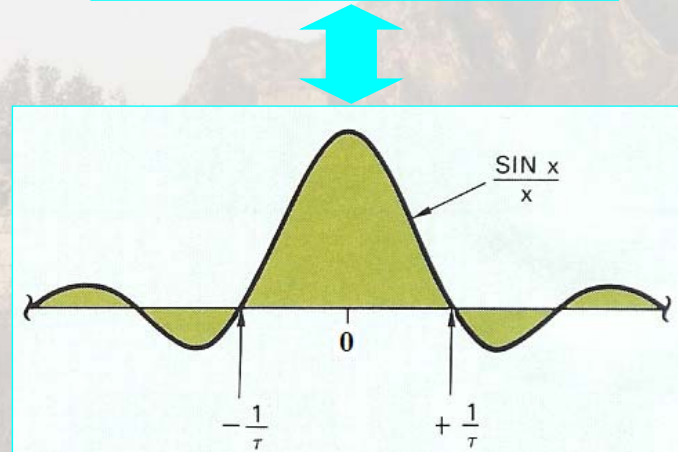
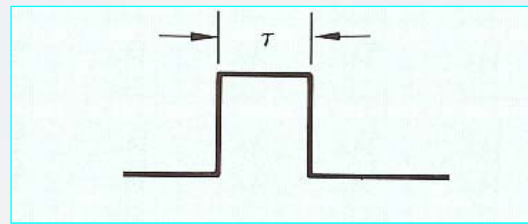
连续正弦波



$$f_1(t) = A \cos \omega_0 t \leftrightarrow F_1(\omega) = A\pi[\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)]$$

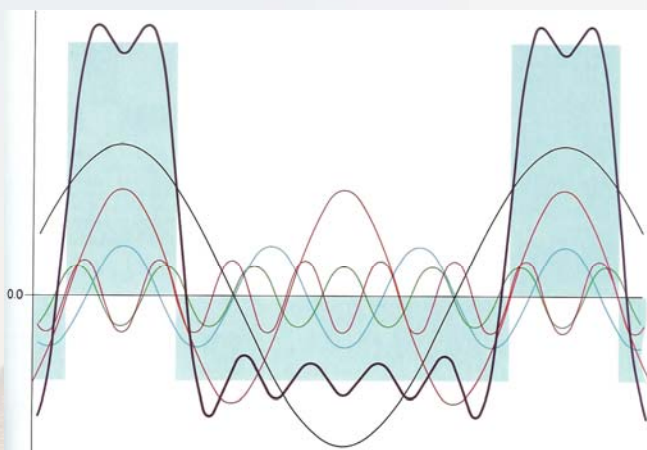
信号参数：幅度、频率

单个无载频（视频）脉冲

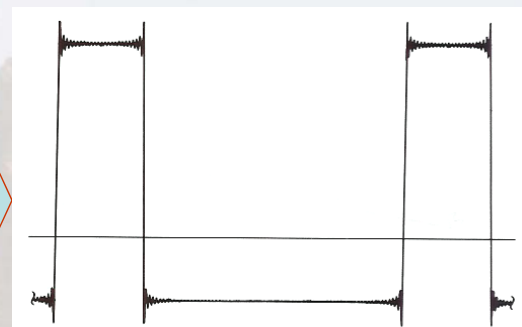


信号参数：幅度、脉冲宽度

周期性方波脉冲串的谐波分析



由基波加4个谐波合成的方波脉冲



由基波加100个谐波合成的方波脉冲

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega_0 t + \phi_1) + A_2 \sin(2\omega_0 t + \phi_2) + A_3 \sin(3\omega_0 t + \phi_3) + A_4 \sin(4\omega_0 t + \phi_4) \dots$$

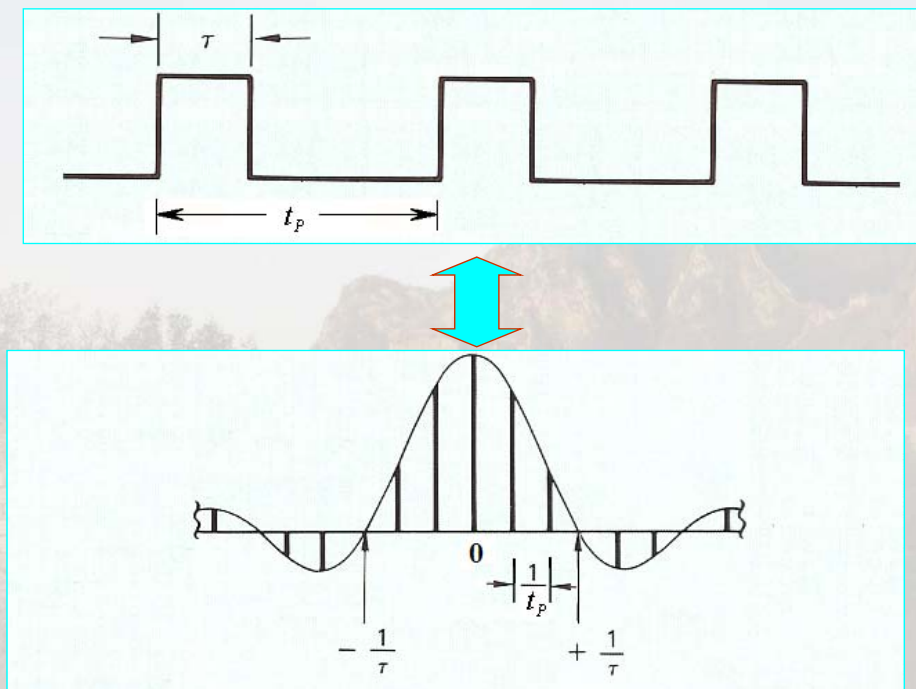
(First Harmonic)

(Second Harmonic)

(Third Harmonic)

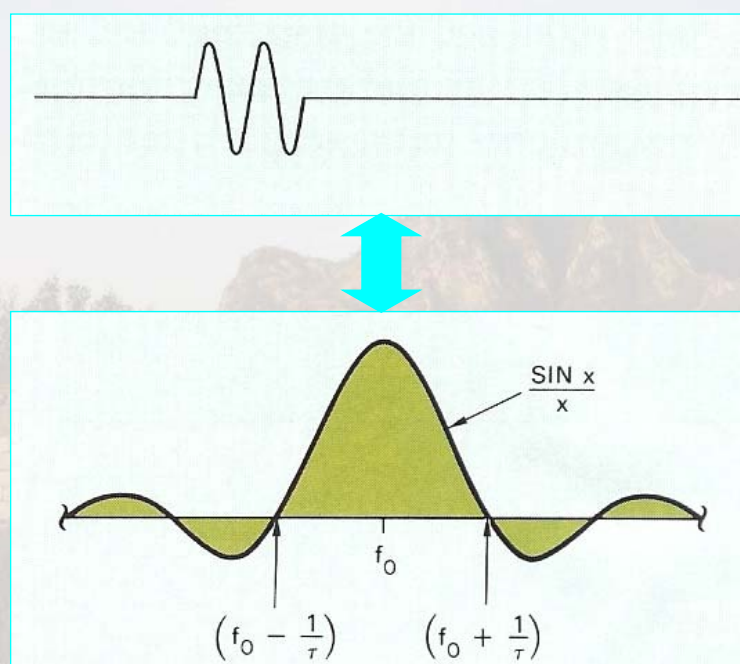
(Fourth Harmonic)

无限长视频脉冲串



每根谱线代表一个谐波频率，其幅值对应于级数展开的系数

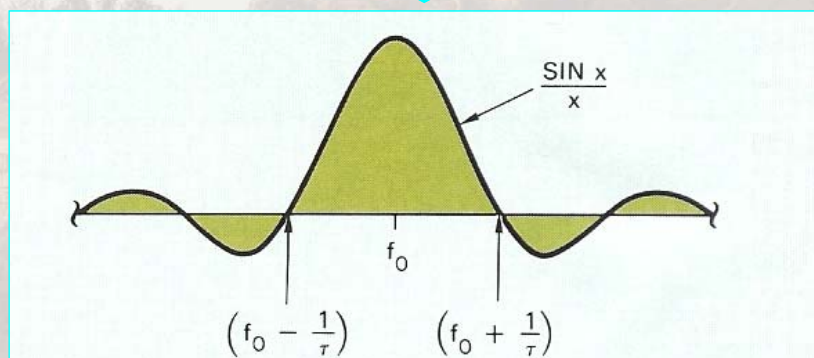
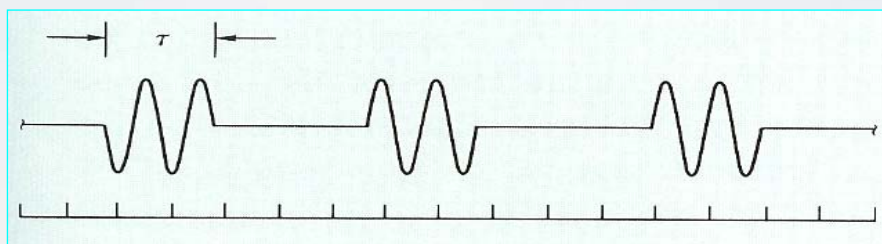
单个载频调制脉冲



(正频率)

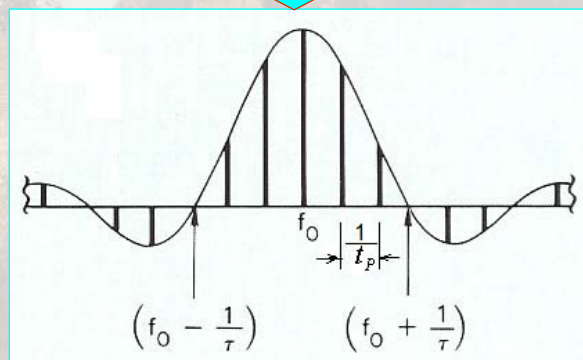
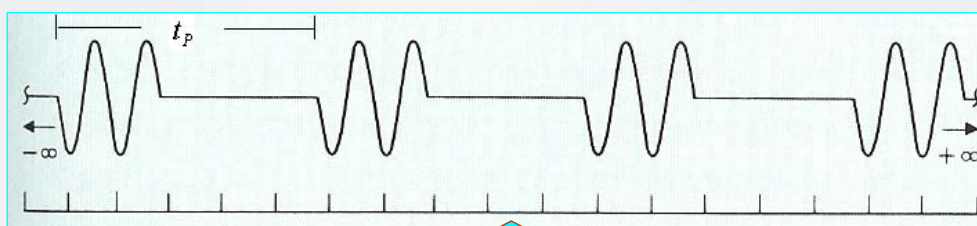
信号参数：幅度、脉冲宽度、调制频率

无限长非相参脉冲串

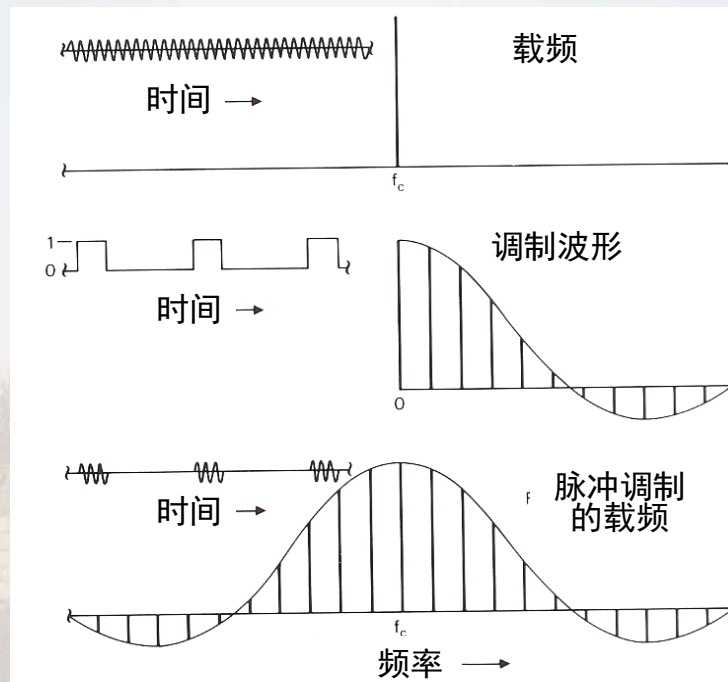


信号参数：幅度、脉冲宽度、调制频率

无限长相参脉冲串



每根谱线代表一个偏离载频的谐波频率，其幅值对应于Fourier级数展开的系数

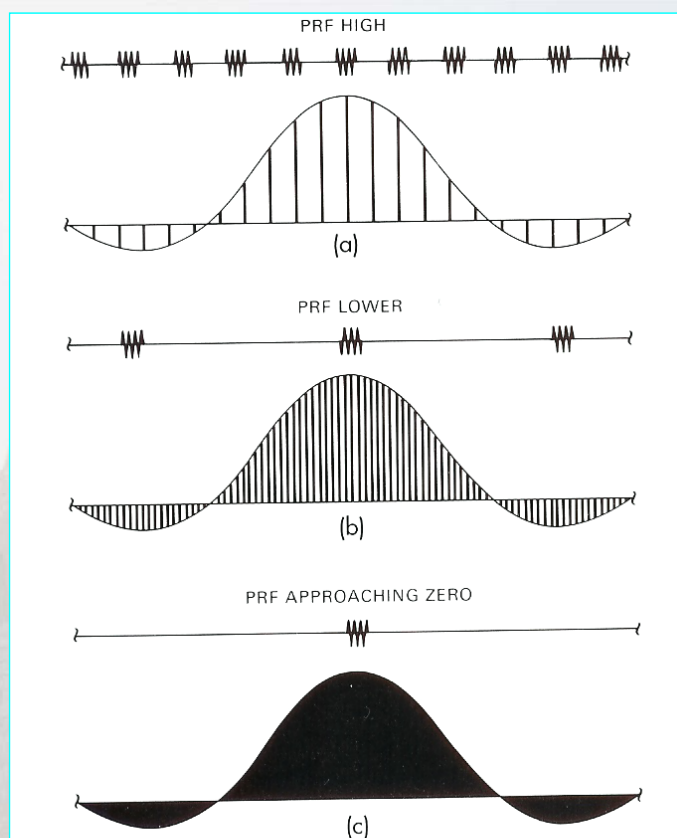


当采用无限长视频脉冲调制一个载频信号时，视频脉冲的每个谐波均产生一个边带。

高脉冲重复频率

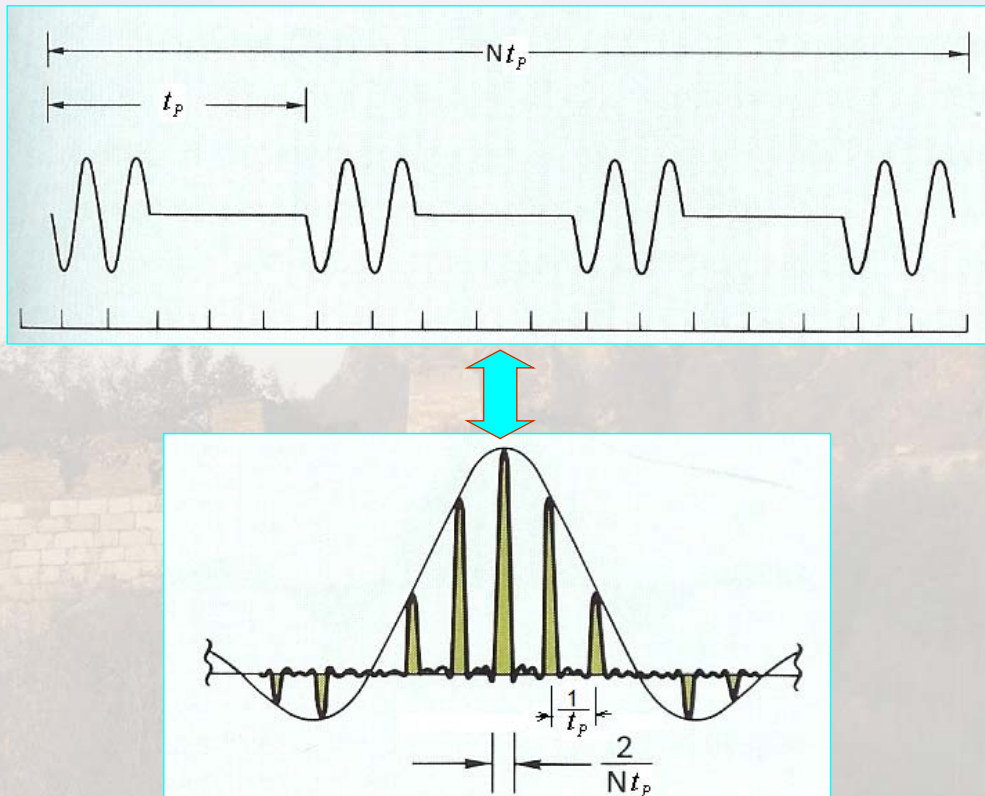
低脉冲重复频率

脉冲重复频率趋于零



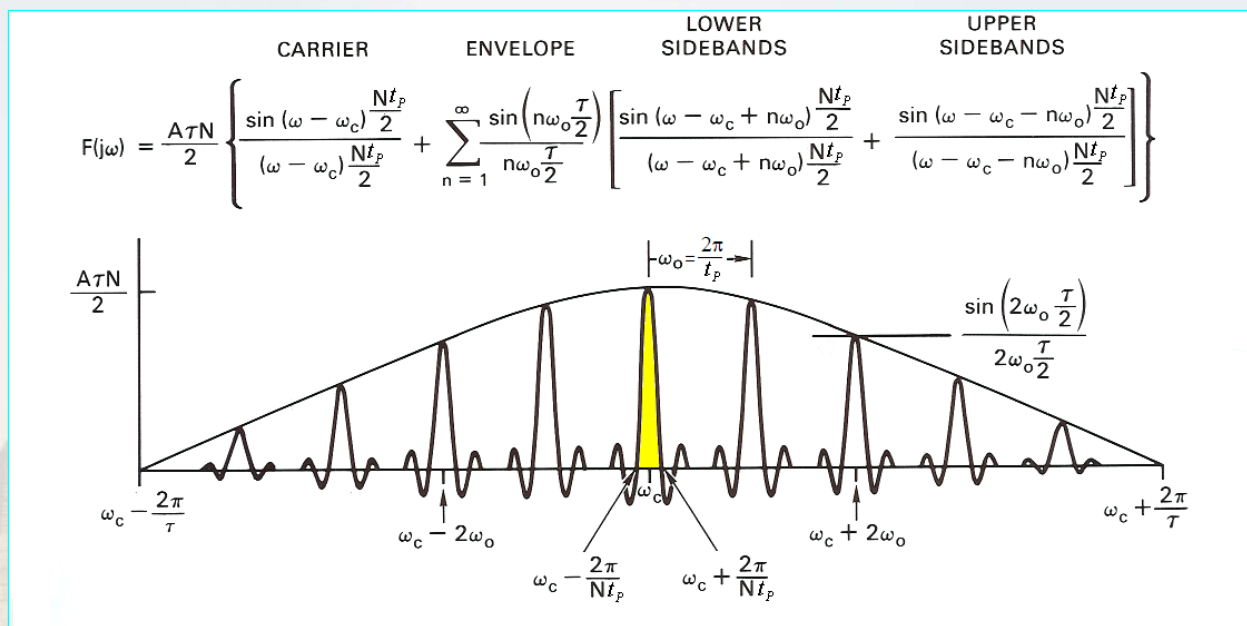
无限长连续脉冲串及其频谱：PRF越高，谱线间距越大；随着PRF趋于0，频谱变成连续谱。

有限长相参脉冲串



Xu: Radar Systems, Chapter-02

21



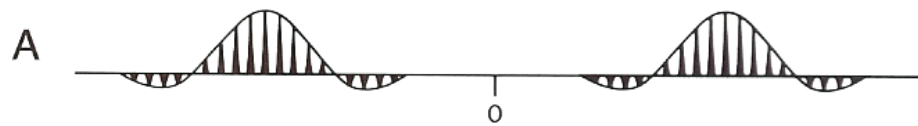
N 个矩形脉冲组成的脉冲串其傅立叶频谱的正频率部分：脉宽 τ ，脉冲重复周期 T_p ，

$$\text{载频 } f_c = \frac{\omega_c}{2\pi}$$

Xu: Radar Systems, Chapter-02

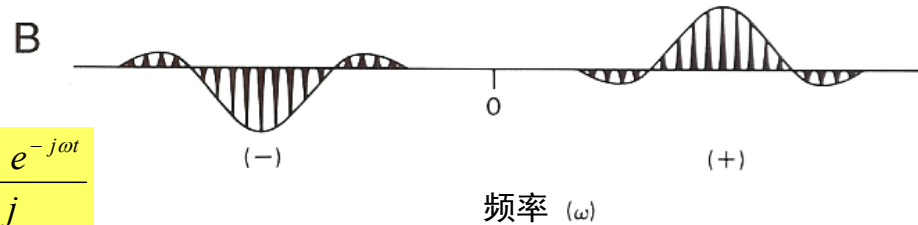
22

TRANSFORM FOR COSINE WAVE (Carrier = $A \cos \omega_c t$)



$$\cos \omega t = \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2}$$

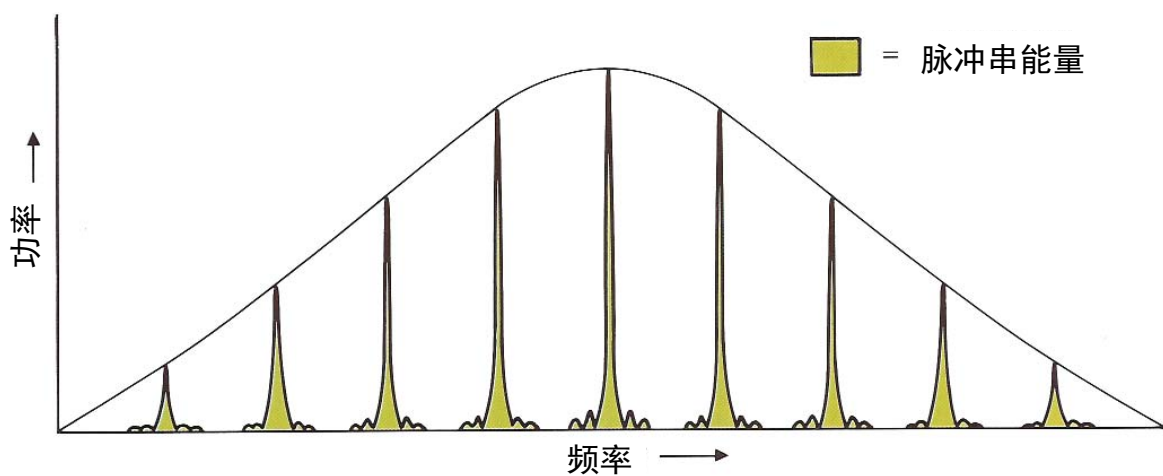
正弦波的变换 (Carrier = $A \sin \omega_c t$)



$$\sin \omega t = \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j}$$

载频为余弦和正弦信号时脉冲串的频谱

信号的功率谱



第2讲 雷达基础

2.1 雷达信号：基本概念

2.2 脉冲波形及其频谱特性

2.3 Maxwell 方程与边界条件

2.4 球面波和平面波概念

2.5 电磁波的极化

2.6 平面波的反射、折射、绕射和散射

Maxwell 方程

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

式中， \mathbf{J} 表示传导电流密度(A/m)； \mathbf{D} 表示电位移矢量(coul/m)； \mathbf{B} 表示磁感应强度(web/m)； σ 反映媒质导电的性能，称为导电率(conductivity)； ϵ 反映媒质极化的性能，称为介电常数(permittivity)；而 μ 则反映媒质磁化的性能，称为磁导率(permeability)

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Ampere's law:

total current density equals to the sum of **conduction** current density and the **displacement** current density.

Maxwell第一方程:

解决了交变场中电流连续性的问题；揭示了变化的电场（即位移电流）也能激发磁场，传导电流和位移电流都是产生磁场的源。这种被激发的磁场都是有旋的，即磁力线是围绕着电流的闭合曲线。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

Faraday's law of induction:

the **induced electric field** is **not** a **conservative** field.

Maxwell第二方程:

表示磁场激发电场的定量关系，即空间上任一点电场强度的旋度等于该点磁感应强度的时间减少率。可以看出，变化的磁场所激发的电场，其性质与静电场不同。静电场是无旋的，而感应电场是有旋的。形象地讲，静电场的电力线是有始有终的，而感应电场的电力线是围绕着感应线的闭合曲线。

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Gauss's law: for **magnetic** field

这是磁通连续性原理的微分形式。它说明恒定电流磁场是个无散场，在磁场中处处既无“源点”也无“汇点”，磁感应线是个无头无尾的闭合曲线。

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$$

Gauss's law: for **electric** field

高斯定理的微分形式:

电场是一发散性的有源场,电荷是电场的发散源。

$\rho_v > 0$,表示该点是场的“源点”,电感应线由此点向外发散;

$\rho_v < 0$,表示该点是场的“汇点”,电感应线向此点汇聚;

$\rho_v = 0$,表示该点电感应线既不发散也不汇聚。

时谐场：向量形式的Maxwell方程

Maxwell方程：

$$\nabla \times \dot{\mathbf{H}} = \dot{\mathbf{J}} + j\omega\dot{\mathbf{D}}$$

$$\nabla \times \dot{\mathbf{E}} = -j\omega\dot{\mathbf{B}}$$

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{B}} = 0$$

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{D}} = 0$$

时谐因子： $e^{j\omega t}$

构造方程：

$$\dot{\mathbf{D}} = \epsilon\dot{\mathbf{E}}$$

$$\dot{\mathbf{B}} = \mu\dot{\mathbf{H}}$$

$$\dot{\mathbf{J}} = \sigma\dot{\mathbf{E}}$$

Constitutive relationship:

for electric field

for magnetic field

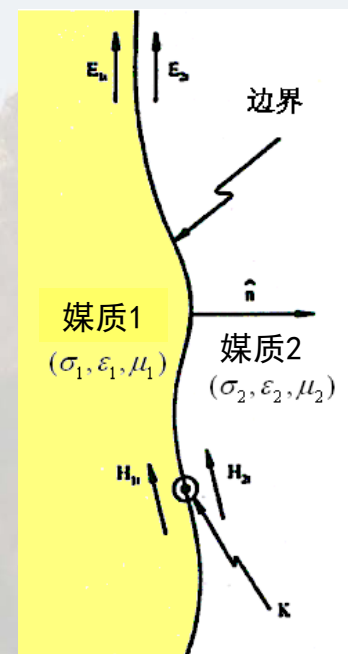
Ohm's law

边界条件

当电磁波通过两个不同媒质边界时，边界附近的电磁场需要满足一定的规则，即边界条件，它把场量、介质的材料特性及边界面上的电荷及电流密度联系在一起。边界条件可以从基本的电磁定律得到。

| 标量形式 | 矢量形式 |
|---|--|
| $E_{t1} = E_{t2}$ | $\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = 0$ |
| $H_{t1} - H_{t2} = J_s$ | $\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = \mathbf{J}_s$ |
| $B_{n1} = B_{n2}$ | $\hat{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) = 0$ |
| $D_{n1} - D_{n2} = \rho_s$ | $\hat{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) = \rho_s$ |
| $J_{n1} = J_{n2}$ | $\hat{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{J}_1 - \mathbf{J}_2) = 0$ |
| $\frac{J_{t1}}{\sigma_1} = \frac{J_{t2}}{\sigma_2}$ | $\hat{\mathbf{n}} \times \left(\frac{\mathbf{J}_1}{\sigma_1} - \frac{\mathbf{J}_2}{\sigma_2} \right) = 0$ |

其中下标t和n分别代表该场量的切向和法向分量。



完纯导体边界条件

- 当两种媒质都非导体时，则 \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 的切向分量和 \mathbf{D} 、 \mathbf{B} 的法向分量在边界连续。
- 若其中一种媒质是完纯导体，假设媒质2是完纯导体，则在媒质2中所有的场量都为0。于是，导体（媒质2）与非导体介质（媒质1）的边界条件简化为：

$$\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}_1 = 0$$

$$\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_1 = \mathbf{J}_s$$

$$\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{B}_1 = 0$$

$$\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{D}_1 = \rho_s$$



| 标量形式 | 矢量形式 |
|---|--|
| $E_{t1} = E_{t2}$ | $\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = 0$ |
| $H_{t1} - H_{t2} = J_s$ | $\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = \mathbf{J}_s$ |
| $B_{n1} = B_{n2}$ | $\hat{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) = 0$ |
| $D_{n1} - D_{n2} = \rho_s$ | $\hat{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) = \rho_s$ |
| $J_{n1} = J_{n2}$ | $\hat{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{J}_1 - \mathbf{J}_2) = 0$ |
| $\frac{J_{t1}}{\sigma_1} = \frac{J_{t2}}{\sigma_2}$ | $\hat{\mathbf{n}} \times \left(\frac{\mathbf{J}_1}{\sigma_1} - \frac{\mathbf{J}_2}{\sigma_2} \right) = 0$ |

电磁场的基本性质：

- 同其它实物一样，场是客观存在的；
- 电磁场具有独立存在的性质。因为场一经产生，即使电荷消失，它还可以继续存在；
- 电磁场也具有微粒的属性。电磁场的基本粒子叫光子。由量子力学可知，光子与实物粒子一样，也具有能量、动量和质量；
- 电磁场与实物粒子可以相互转化。如正负电子可以转化为一对光子，而光子也可以转化成负电子与正电子对。

电磁场不同于通常由电子、质子、中子等基本粒子所构成的实物，它是一种特殊的物质：

- 电磁场的基本成份是光子，它没有静止质量；
- 实物可以以任意不大于光速的速度在空间运动或加速运动，但电磁场在真空中只能以光速运动；
- 实物原子所占据的空间不能同时为另一原子所占据，但同一空间内可以存在许多电磁场而不发生影响。

电磁波的传播速度：

$$V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

式中 ϵ, μ 分别为传播介质的介电常数和磁导率。

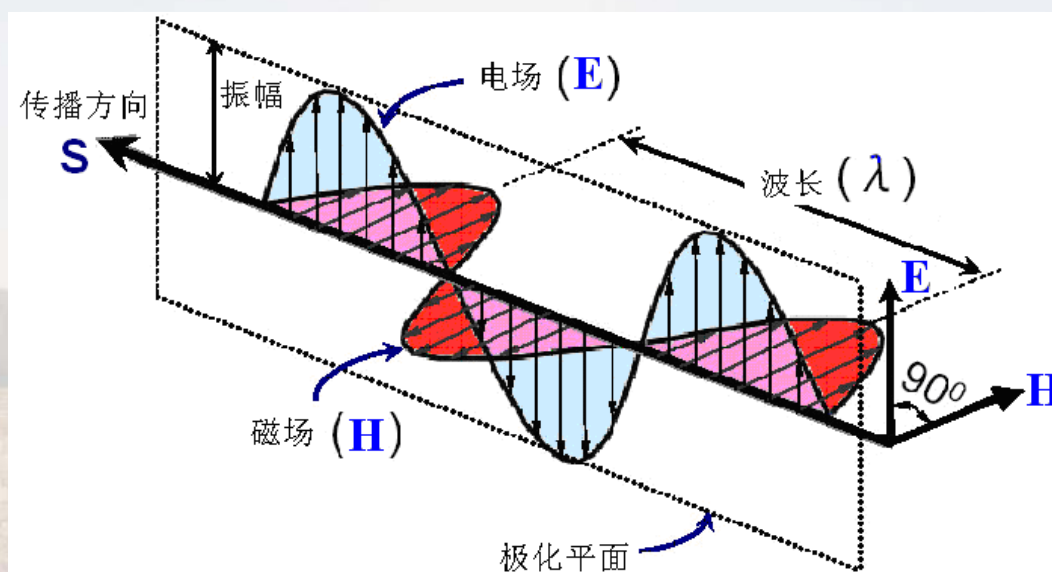
自由空间中：

$$\epsilon = \epsilon_0 = 8.854187817 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Poynting 矢量:



$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

第2讲 雷达基础

2.1 雷达信号：基本概念

2.2 脉冲波形及其频谱特性

2.3 Maxwell 方程与边界条件

2.4 球面波和平面波概念

2.5 电磁波的极化

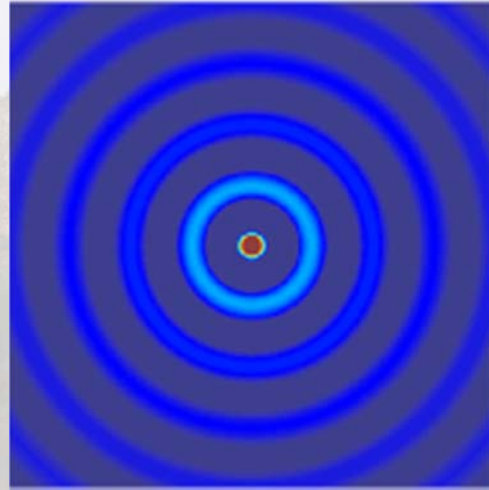
2.6 平面波的反射、折射、绕射和散射

球面波和平面波

当波源在介质中振动时，振动将沿着各个方向传播，形成波动。



机械振动波：纵波



电磁振荡波：横波

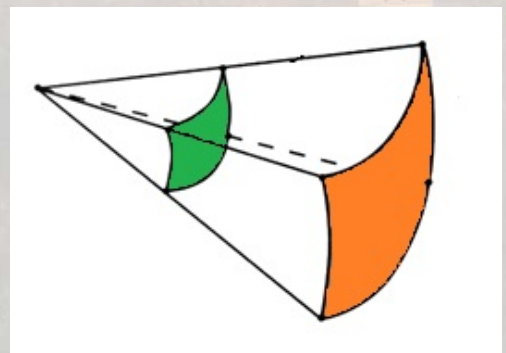
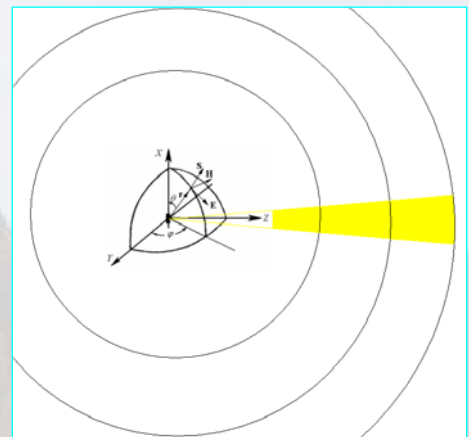
波前 (Wavefront) :

为了形象地描述在某一时刻波动所传播到各点的位置，可以想象将这些点联结成一个面，这个面叫做波前。

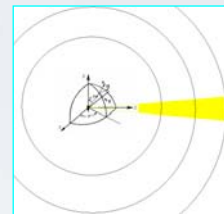
波阵面：

为了形象地描述波动传播时介质中各点振动相位之间的相互关系，我们将振动相位相同的各点联结成面，这种面叫做波阵面。

□ 波前实际上就是最前面的波阵面



球面波-平面波之间的相位差



横向偏移量 x 处入射相位相对于目标中心处的偏差量:

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot [(x^2 + R^2)^{1/2} - R]$$



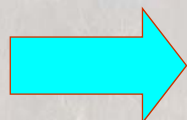
Taylor展开

$$(1+x)^{1/2} = 1 + \frac{1}{2}x - \dots$$

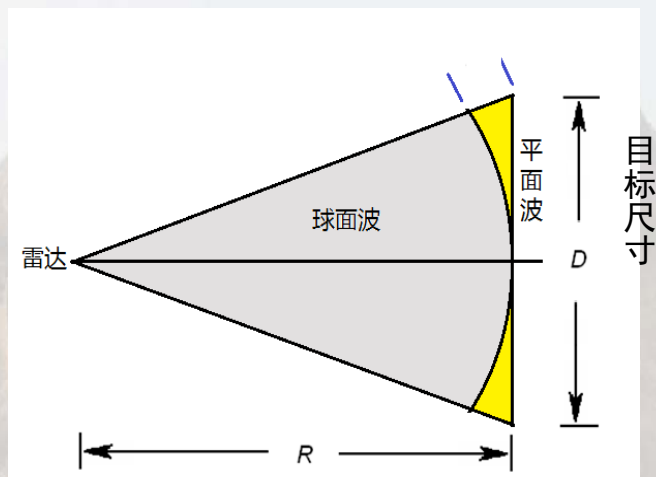
$$\Delta\theta \approx \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x^2}{2R}$$

若目标尺寸为 D , 取

$$x = D/2$$



$$\Delta\theta_D \approx \frac{\pi}{4R} \cdot \frac{D^2}{\lambda}$$



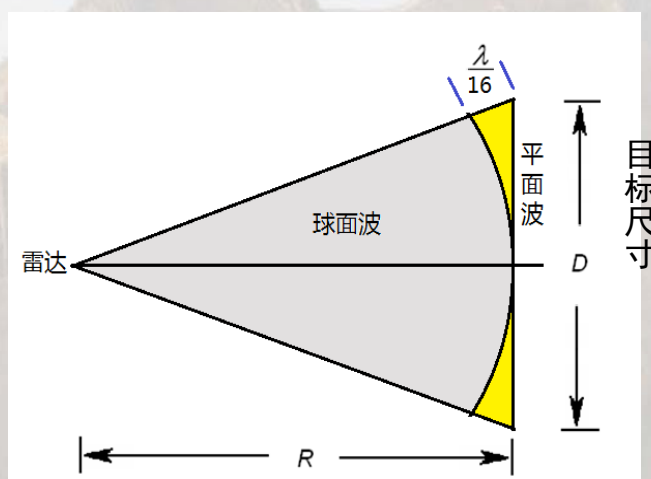
远场区准则 (Rayleigh) :

Rayleigh准则要求把球面波近似看成平面波时, 两者波阵面之间单程、单边相位差不大于 22.5° ($\pi/8$, 相当于双程、双边 90°), 也即距离差为 $\lambda/16$, 有

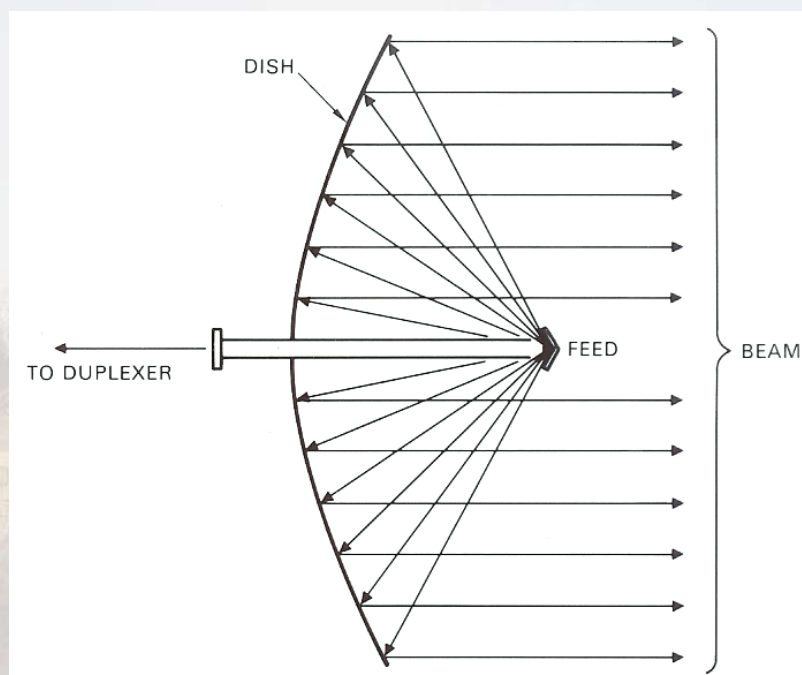
$$\Delta\theta_D \approx \frac{\pi}{4R} \cdot \frac{D^2}{\lambda} \leq \frac{\pi}{8}$$



$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}$$



平面波生成—— 紧缩场(Compact Range)



紧缩场工作原理

第2讲 雷达基础

2.1 雷达信号：基本概念

2.2 脉冲波形及其频谱特性

2.3 Maxwell 方程与边界条件

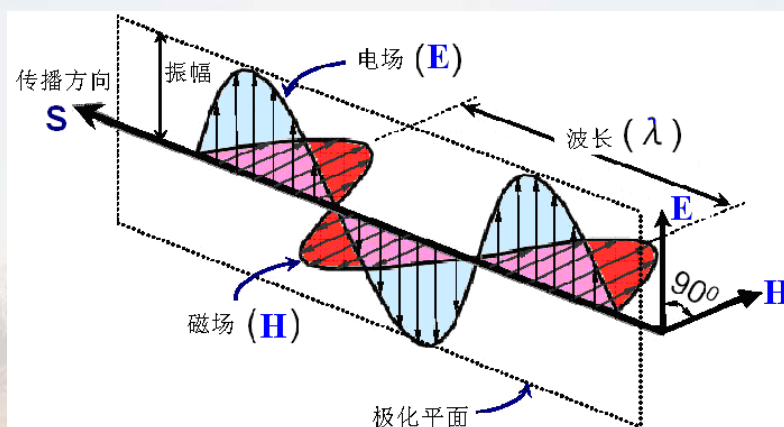
2.4 球面波和平面波概念

2.5 电磁波的极化

2.6 平面波的反射、折射、绕射和散射

电磁波的极化

极化 (polarization) 与极化波：

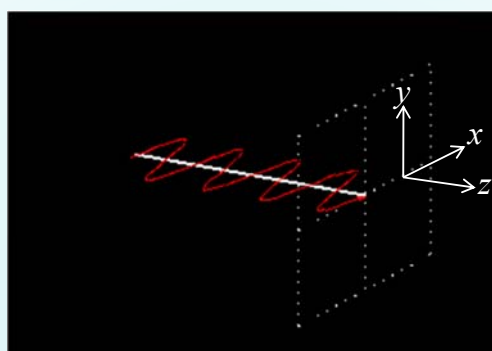


在电波传播时，电场矢量在垂直于传播方向的平面内呈现具有确定规律的振动，这种现象称为**极化**或偏振，这种波称为**极化波**。

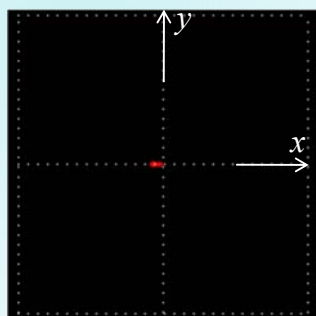
□ 波的极化是由**电场的方向**决定的。

雷达波的极化、极化合成与分解

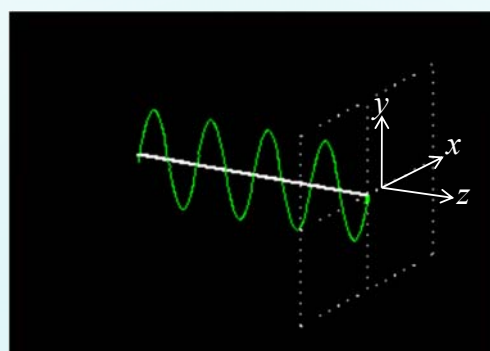
—— 线极化



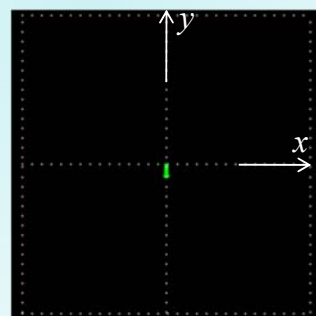
电场
矢量



水平极化：永远在一个水平平面内



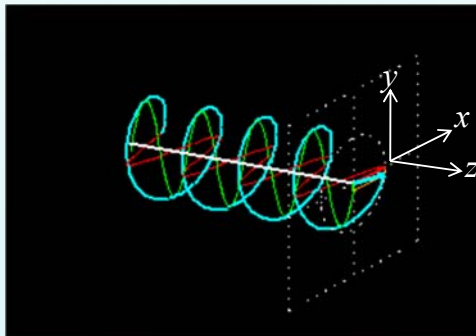
电场
矢量



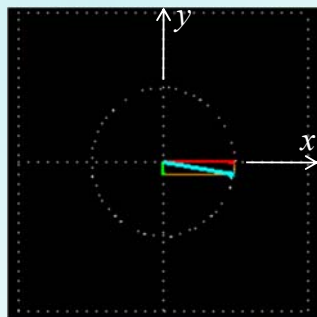
垂直极化：永远在一个垂直平面内

雷达波的极化、极化合成与分解

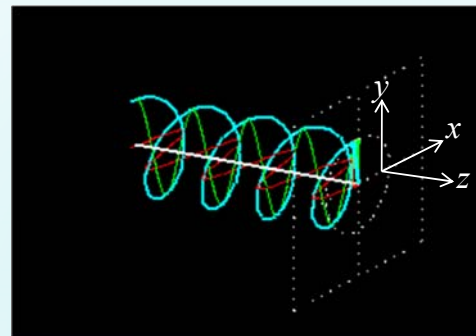
--- 圆极化



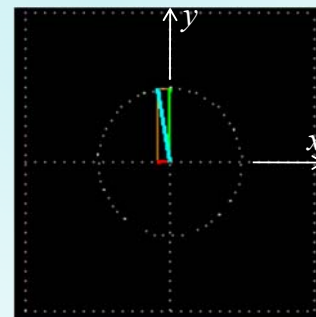
电
场
矢
量



左旋圆极化：顺着传播方向看符合左手法则



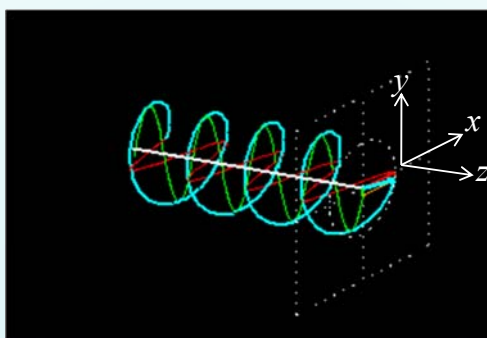
电
场
矢
量



右旋圆极化：顺着传播方向看符合右手法则

雷达波的极化、极化合成与分解

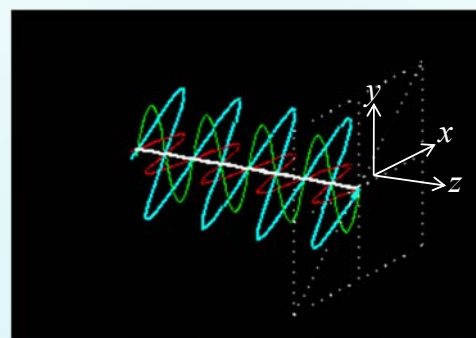
--- 极化合成与分解



电
场
矢
量



两个具有相同波长、振幅、相位相差 90° 、在一对正交平面内振荡的波叠加，形成圆极化波；若振幅不等，则形成椭圆极化波。



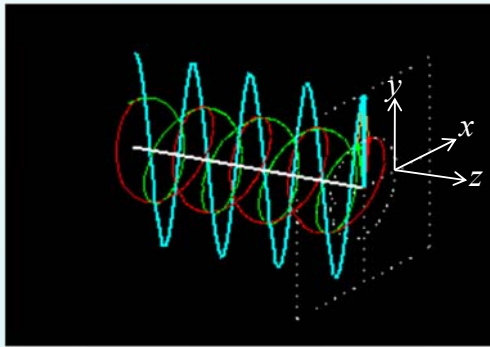
电
场
矢
量



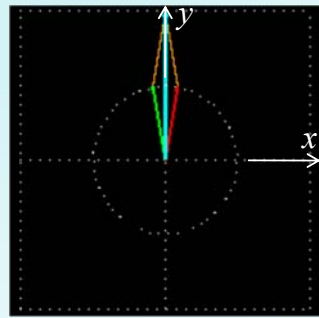
两个具有相同波长、振幅和相位、在一对正交平面内振荡的线极化波叠加，形成 45° 线极化波；若振幅不等，则形成其他角度的线极化波。

雷达波的极化、极化合成与分解

--- 极化合成与分解



电
场
矢
量



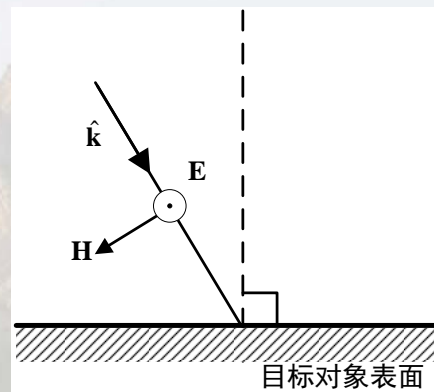
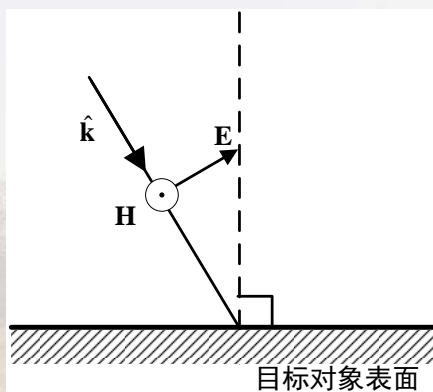
两个具有相同波长、振幅、分别为左旋和右旋圆极化叠加，形成线极化波。

小结：

- 水平与垂直极化构成一对正交极化；
- 左旋与右旋圆极化也构成一对正交极化；
- 这是雷达中使用最广泛的两对正交极化基。当然，也还存在其他形形色色的正交极化基；
- 不同极化波之间可以相互合成与分解；
- 两个线极化波叠加可合成椭圆极化波；
- 两个分别为左、右旋的圆极化叠加可合成线极化波。

电磁场理论 vs 雷达测量中的“极化”

电磁场理论：



参考面：入射面（目标位置）

极化分解 { 平行极化：电场矢量平行于入射面（极化方向取决于入射角）
垂直极化：电场矢量垂直于入射面（极化方向与入射角无关）

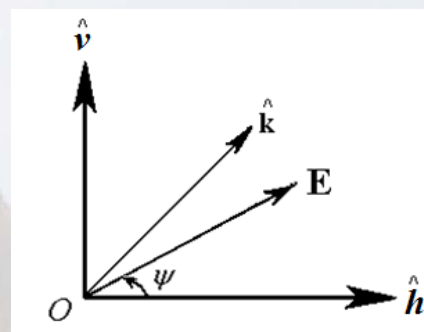
(平行-Parallel；垂直-Perpendicular)

雷达测量：

参考面：水平面（地面，与目标无关）

极化分解 { 水平极化：电场矢量平行于水平面
垂直极化：与水平极化方向正交

(水平-Horizontal, 垂直-Vertical)



水平极化和垂直极化的电场矢量方向均与雷达的观测方向有关。

两种极化分解：

“垂直”极化：名称相同，含义完全不同！

第2讲 雷达基础

2.1 雷达信号：基本概念

2.2 脉冲波形及其频谱特性

2.3 Maxwell 方程与边界条件

2.4 球面波和平面波概念

2.5 电磁波的极化

2.6 平面波的反射、折射、绕射和散射

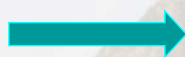
平面波的传播

理想均匀媒质：

- ◆ 在空间任一点，媒质的性质都是相同的，即媒质的电特性参数（介电常数和磁导率）不随位置而变化；
- ◆ 媒质的性质与场强的大小无关；
- ◆ 媒质的性质同电场和磁场的取向无关；
- ◆ 媒质中没有自由电荷，即 ρ_v 处处都等于零。

复数信号： $\dot{\mathbf{E}}(x, y, z, t) = \dot{\mathbf{E}}_m(x, y, z)e^{j\omega t}$

$$\begin{aligned}\nabla \times \dot{\mathbf{H}} &= \dot{\mathbf{J}} + j\omega \dot{\mathbf{D}} \\ \nabla \times \dot{\mathbf{E}} &= -j\omega \dot{\mathbf{B}}\end{aligned}$$

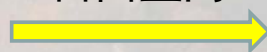


$$\begin{aligned}\nabla^2 \dot{\mathbf{E}} + k^2 \dot{\mathbf{E}} &= 0 \\ \nabla^2 \dot{\mathbf{H}} + k^2 \dot{\mathbf{H}} &= 0\end{aligned}$$

k ：波数，即波的空间频率

$$k = \omega \sqrt{\epsilon \mu}$$

自由空间



$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

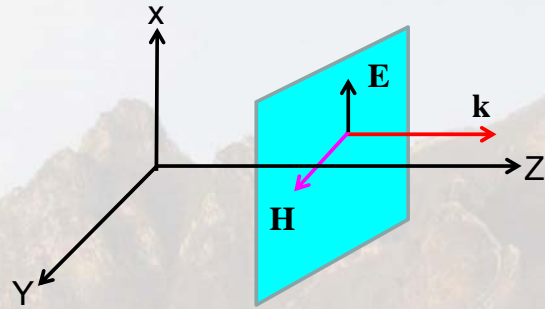
平面波的传播:

$$E_x = E_m e^{j(\omega t - kz + \phi_0)}$$

$$H_y = H_m e^{j(\omega t - kz + \phi_0)}$$

$$H_m = \frac{E_m}{\eta}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (\text{波阻抗, 在自由空间: } \eta = 120\pi \approx 377 \Omega)$$



理想均匀介质中均匀简谐平面波的基本性质:

□ 均匀平面波在能流传播方向上没有电场和磁场分量，**E**、**H**和传播矢量**k**相互垂直，满足右手螺旋关系，称为**横电磁波 (TEM)**

□ 振幅不变，相位随时间和空间位置连续变化

- 在任一确定空间位置，电磁场都随时间正弦振动
- 在任一确定时刻，电磁场随空间正弦分布

□ 波阻抗 η 为常数，且为实数，并且

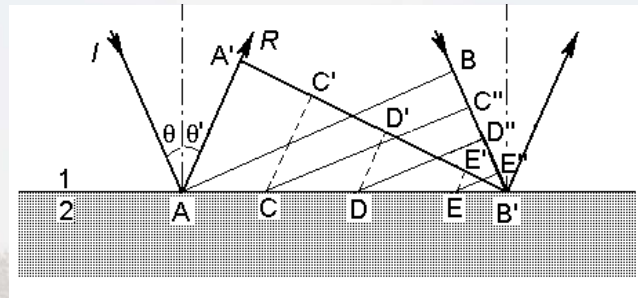
$$E_m = \eta H_m$$

- 电场和磁场不仅具有相同的波形，且在同一点的相位也相同；

□ 波的传播速度

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

平面波的反射

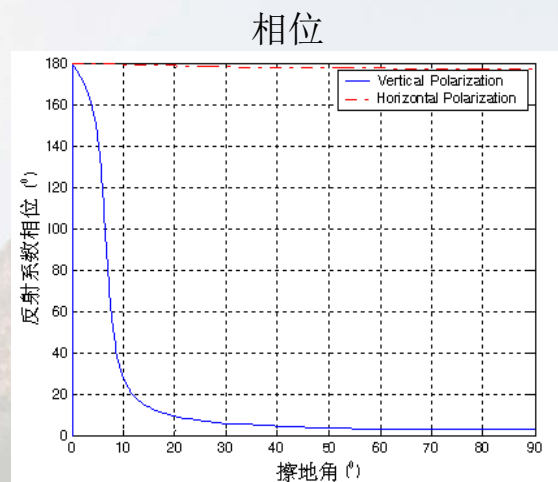
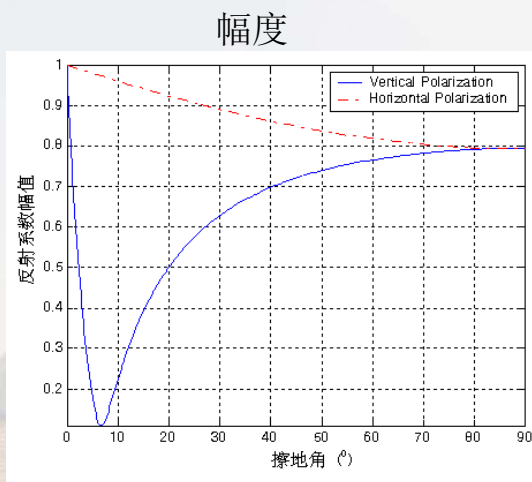


平面波的**反射定律**:

入射线、反射线和介质分界面的法线在同一平面内, 并且入射角等于反射角, 即

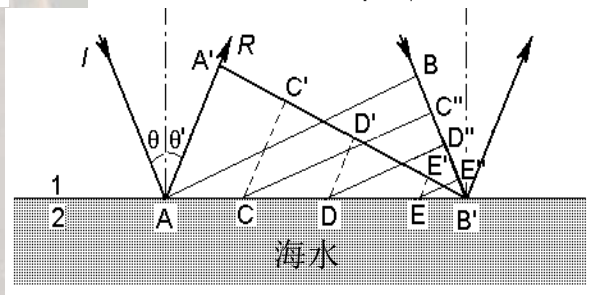
$$\theta = \theta'$$

例：平静海水的菲涅尔反射系数



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

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

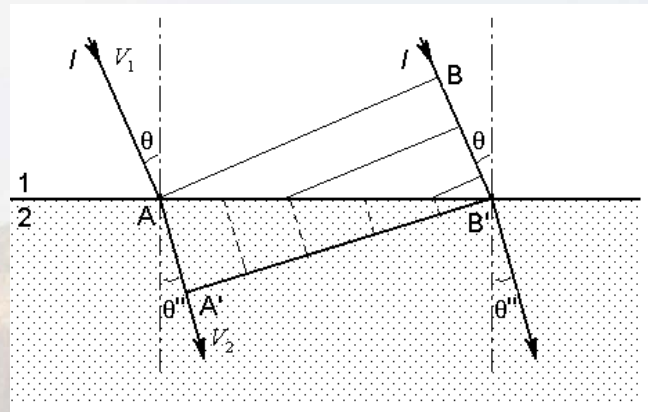


平面波的折射

平面波的**折射定律**:

入射线、折射线和介质分界面的法线在同一平面内, 并且入射角的正弦与折射角的正弦之比等于波在两种介质中的速度之比。

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta''} = \frac{V_1}{V_2}$$

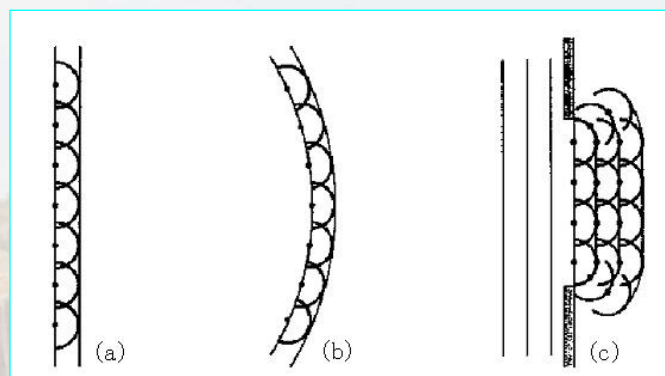


惠更斯原理

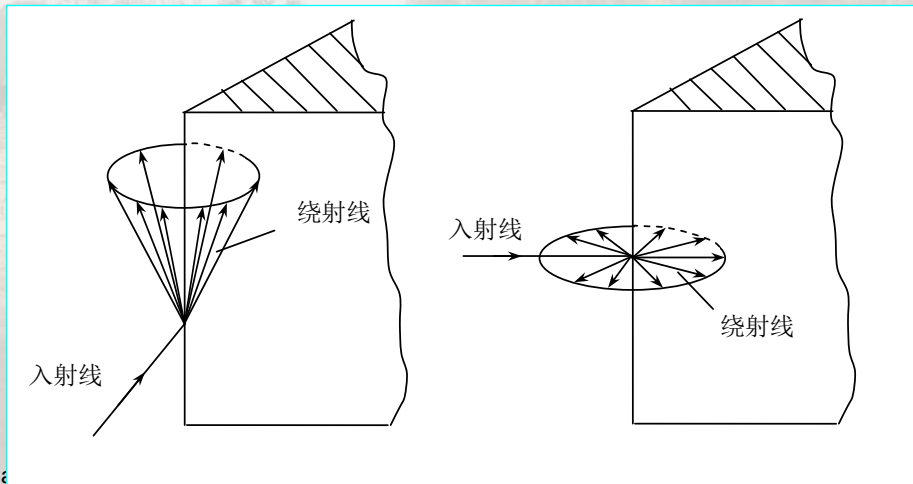
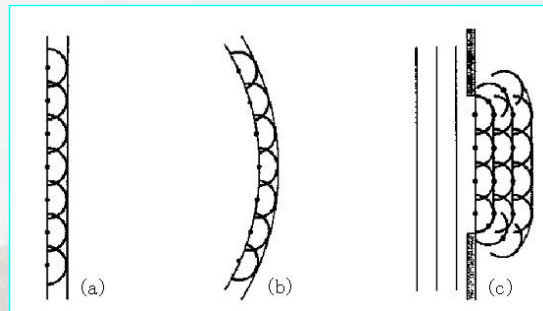
(1) 平面波在传播过程中保持为平面波;

(2) 柱面波或球面波在传播过程中仍保持为柱面波或球面波;

(3) 当平面波穿过孔隙传播时, 通过空隙后的波将超出孔径范围, 并在孔径边缘处发生弯曲, 此即所谓的绕射现象。



平面波的绕射

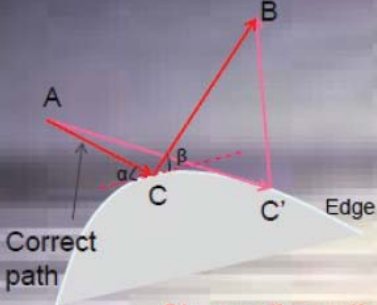


海啸波的反射与绕射



费马原理与凯勒锥

Keller's Cone

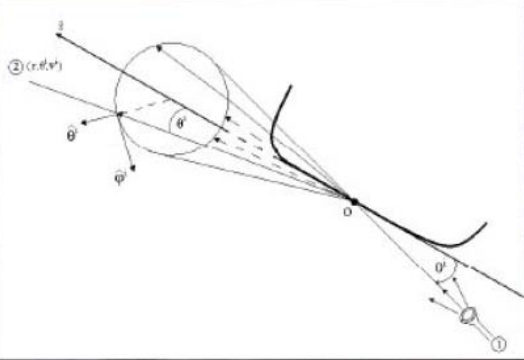
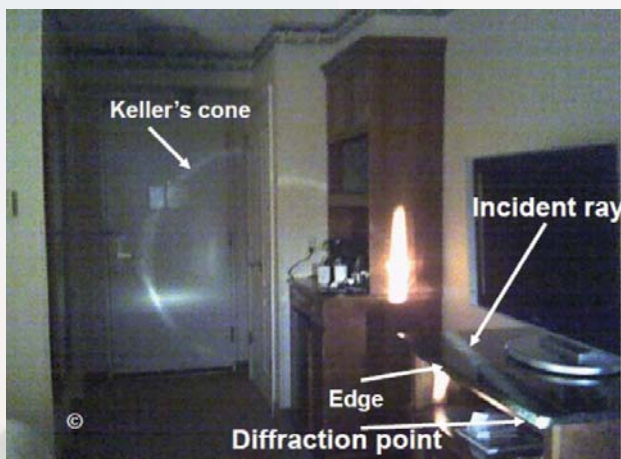


Fermat's Principal:
If an electromagnetic ray starting from a point 'A' is reaching a point 'B' after **diffracting** via a point 'C' on an edge, then the path chosen by ray is such that total travelled distance by ray is the shortest.
The point C is such that it also satisfies Snell's law: $\alpha = \beta$ creates a cone.

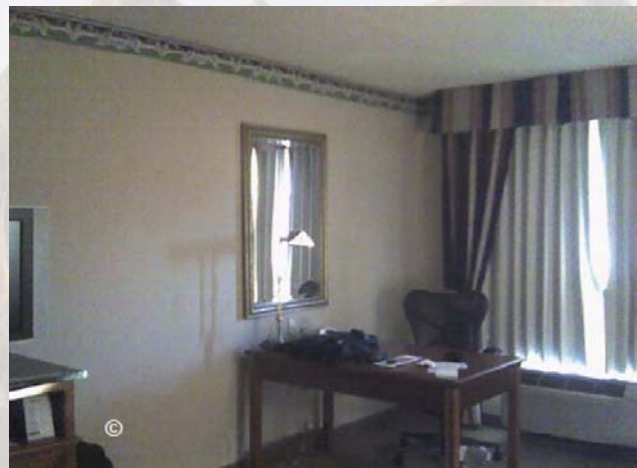
Shows discontinuity at shadow boundaries

$$\vec{E}^{GTD} = \vec{E}^{go} + \vec{E}^d$$

Shows singularity at shadow boundaries

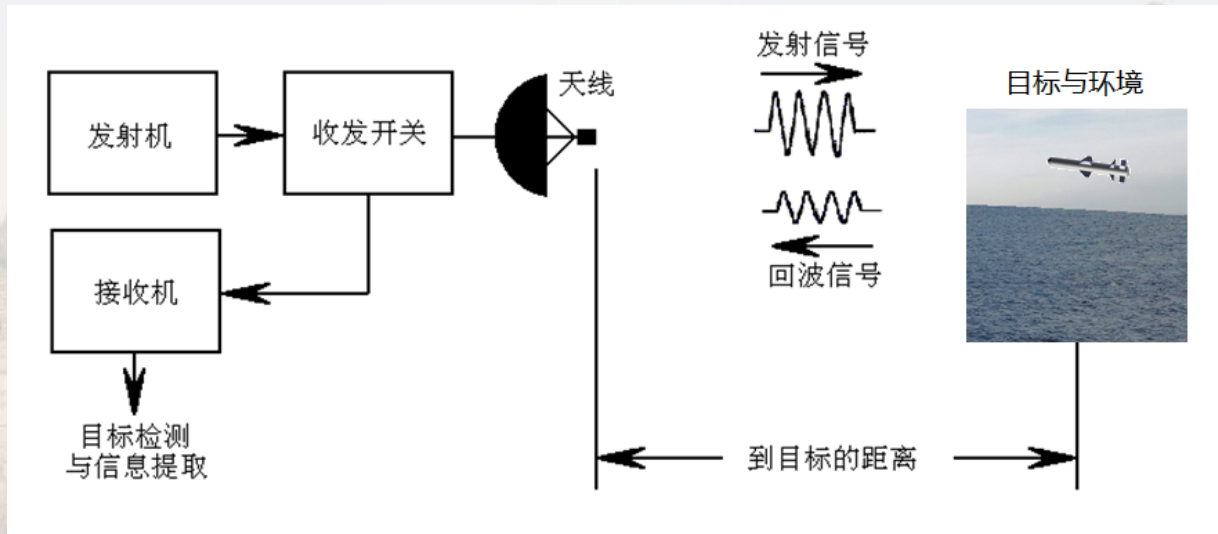



Y. Rahmat-Samii, GTD, UTD and STD: A historical revisit, IEEE APWC'2012, Cape Town, SA, Sept. 2012.



Observation by Prof. Rahmat-Samii in a hotel room in Florida

为什么电磁理论对于雷达如此重要？



海面上高架桥的极化SAR图像，显示出多径散射的典型特征

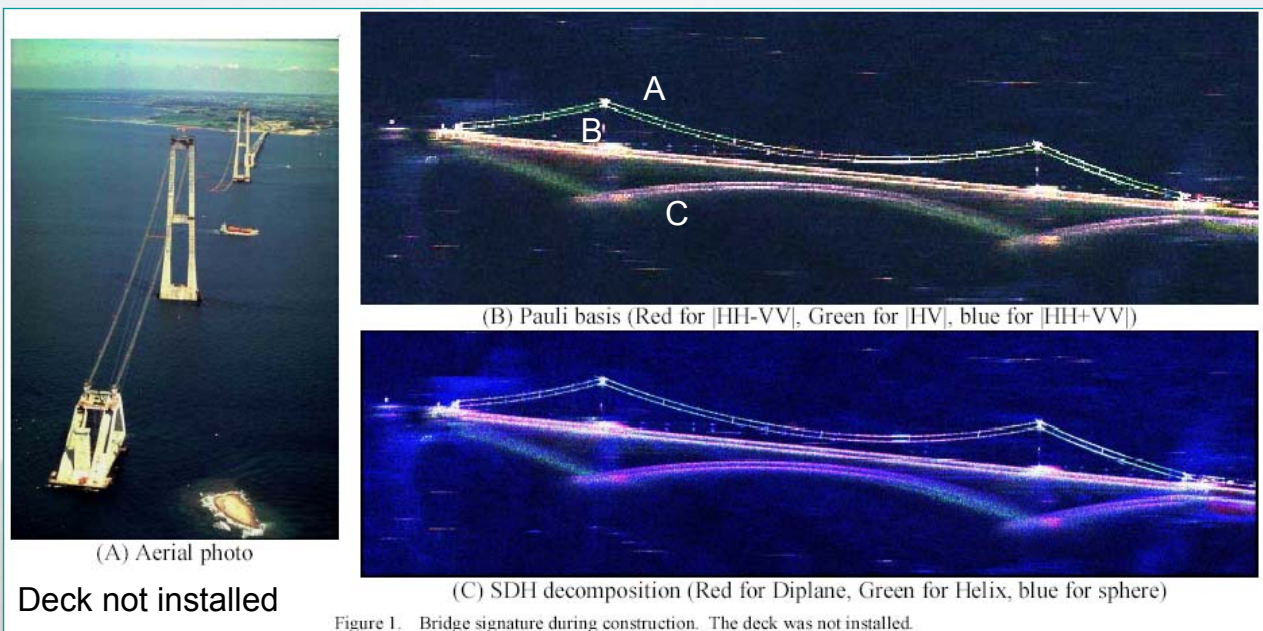
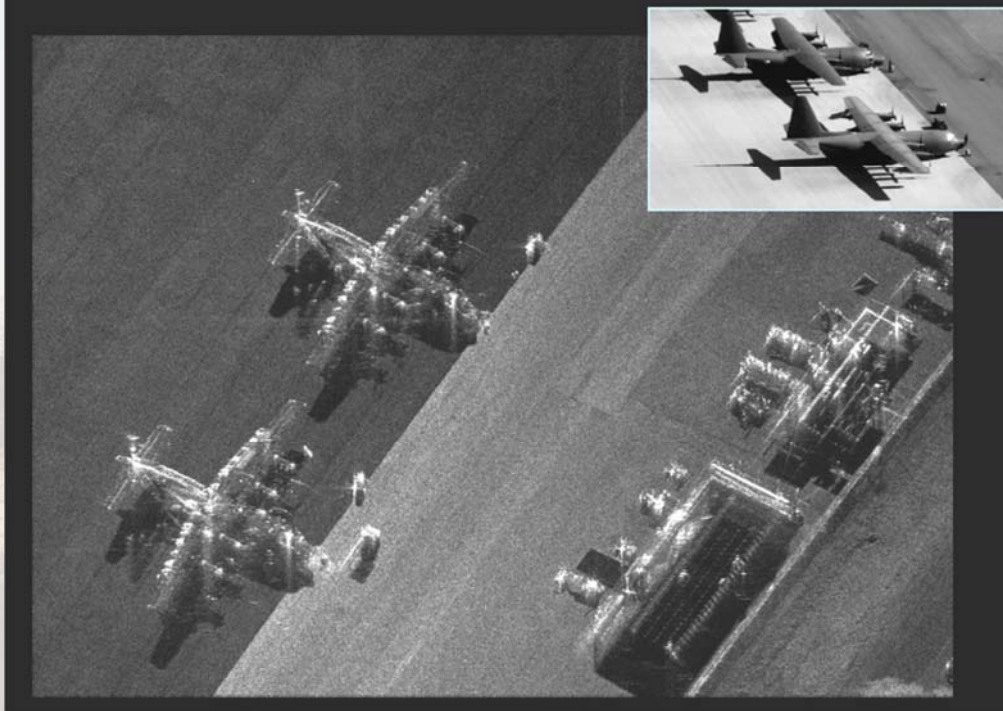


Figure 1. Bridge signature during construction. The deck was not installed.

- A -- Single bounce
- B -- Double bounce: radar-cable/tower-sea-radar/sea-cable/tower-radar
- C -- Triple bounce: radar-sea-cable/tower-sea-radar

Courtesy of J.S. Lee, T.L. Ainsworth, E. Krogagor and W. M. Boerner,
"Polarimetric Analysis of radar signatures of a manmade structure", Proc. IGARSS 2006.

KA-BAND C-130s ON FLIGHT LINE 4-INCH RESOLUTION

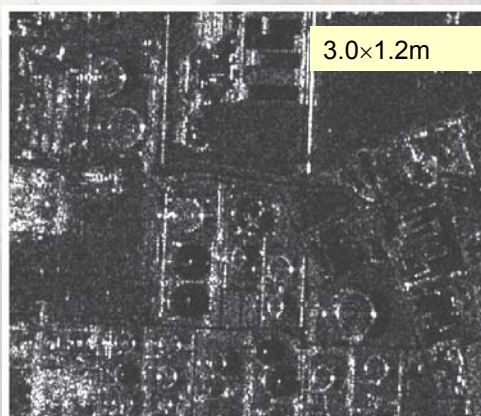


机场驻泊飞机的SAR图像

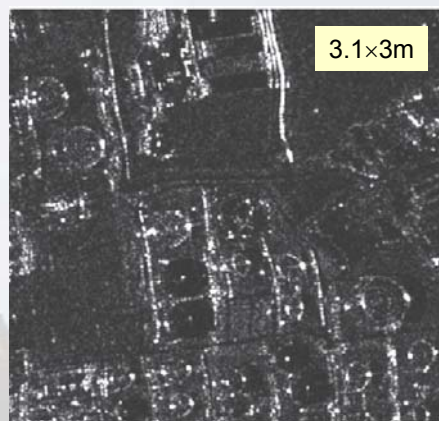
地面储油罐的光学图像和雷达图像对比，
雷达图像中体现了复杂的电磁散射机理。



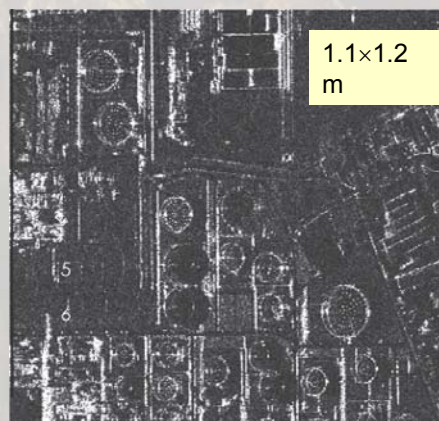
光学



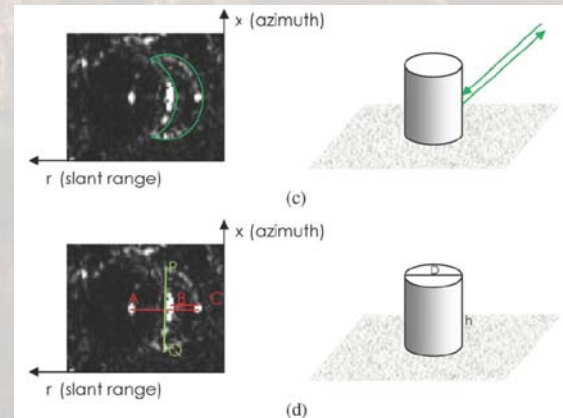
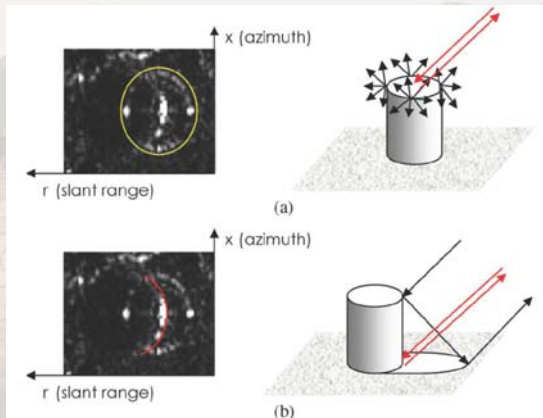
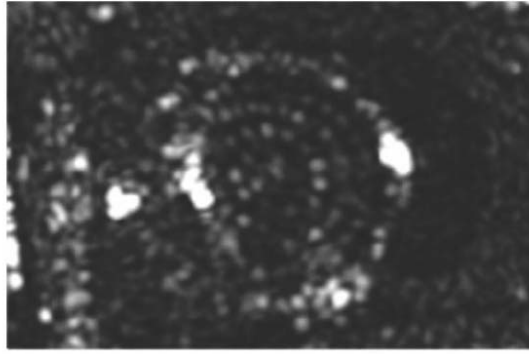
3.0×1.2m



3.1×3m

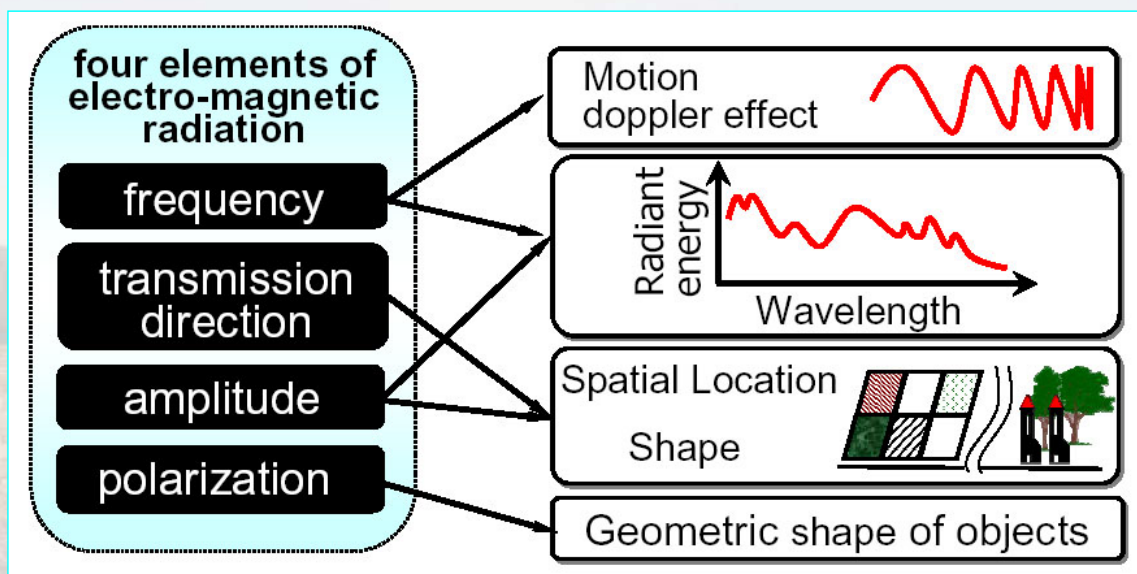


1.1×1.2
m

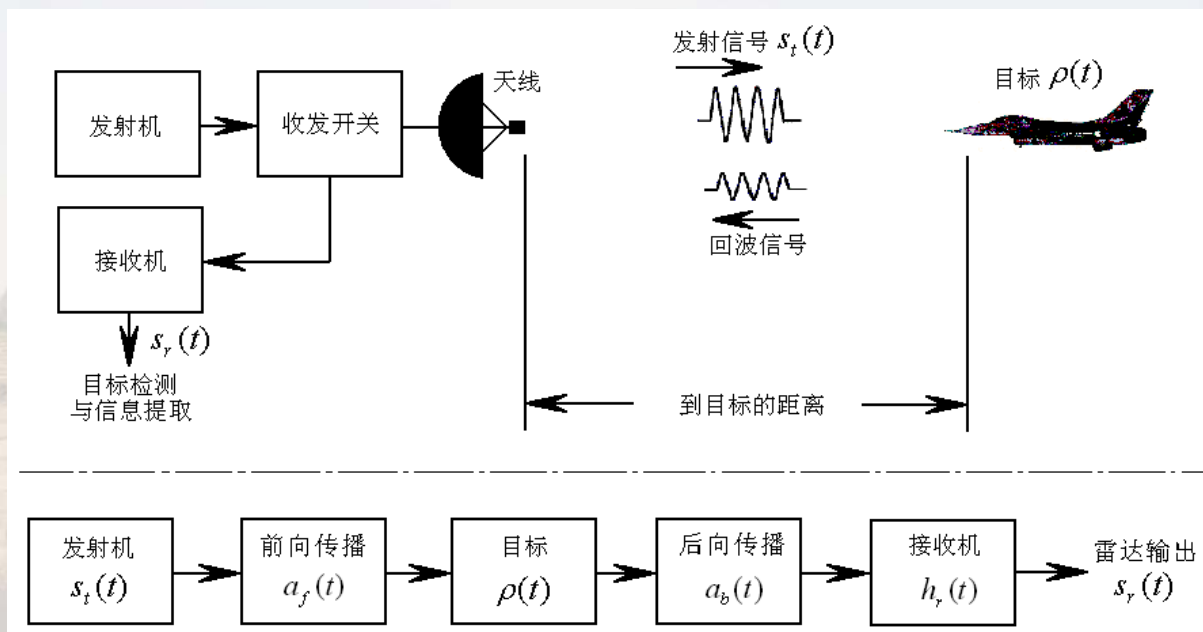


地面储油罐的典型电磁散射机理及其在SAR图像中的表现形式

电磁波属性 vs 雷达遥感特征



分析和解决目标与环境对雷达波的散射问题，主要依靠电磁散射理论



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