

# 北京航空航天大学研究生院 《现代雷达系统理论》

## 第7讲：雷达波形与处理（下）

北京航空航天大学 许小剑  
2020年秋季学期

Xu: Radar Systems, Chapter-07

## 第六讲 雷达波形与处理（上）

- 6.1 匹配滤波器
- 6.2 雷达模糊度函数
- 6.3 雷达波形与分辨率的概念
- 6.4 典型雷达波形的模糊度函数
- 6.5 脉冲串信号的雷达模糊度函数
- 6.6 数字脉冲压缩
- 6.7 波形分集概念及应用

Xu: Radar Systems, Chapter-07

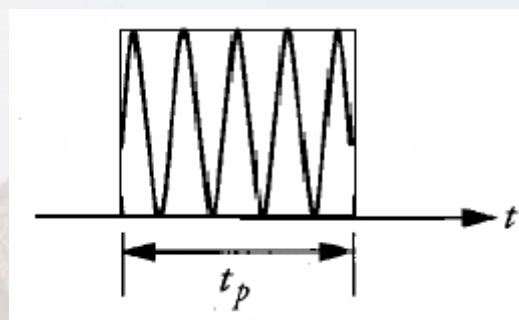
## 第七讲 雷达波形与处理（下）

- ❑ 匹配滤波器
- ❑ 雷达模糊度函数
- ❑ 雷达波形与分辨率的概念
- ❑ 典型雷达波形的模糊度函数
- ❑ 脉冲串信号的雷达模糊度函数
- ❑ 数字脉冲压缩
- ❑ 波形分集概念及应用

### 单个点频脉冲信号的AF

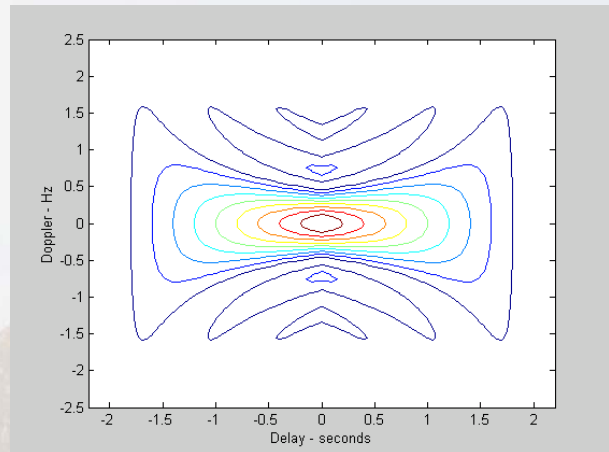
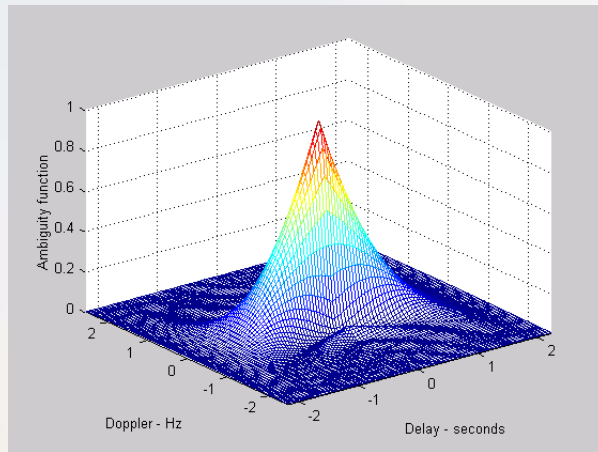
信号:

$$s(t) = u(t)e^{j\omega_c t}$$

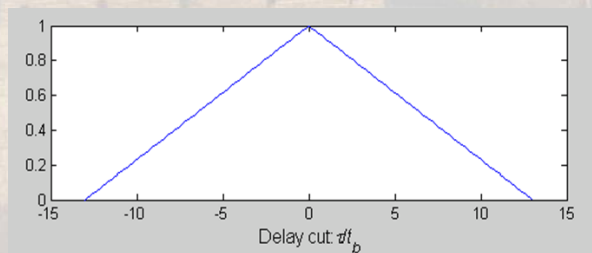


模糊度函数:

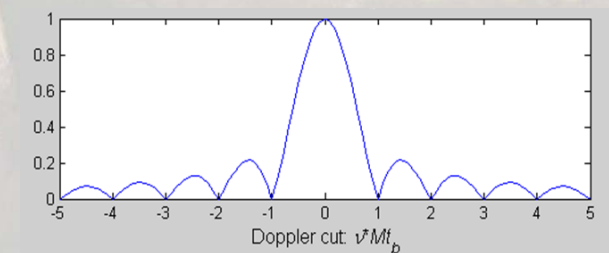
$$|\chi(\tau, f_d)| = \begin{cases} (1 - \frac{|\tau|}{t_p}) \text{sinc}[\pi f_d t_p (1 - \frac{|\tau|}{t_p})], & |\tau| \leq t_p \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$



单个点频调制矩形脉冲的时延-多普勒模糊图



时延（距离）切片



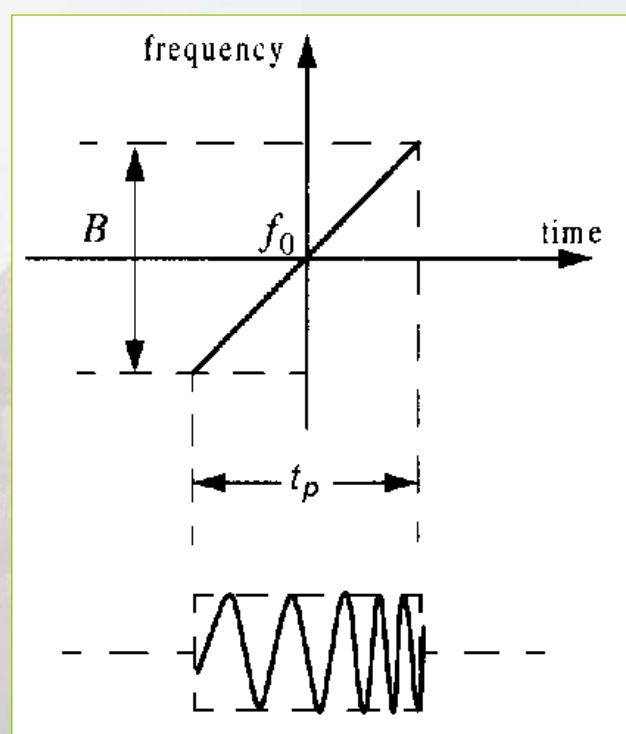
多普勒（速度）切片

## 线性调频波（LFM）

向上调频:

$$s(t) = \text{Re}\{u(t)e^{j2\pi f_0 t}\}$$

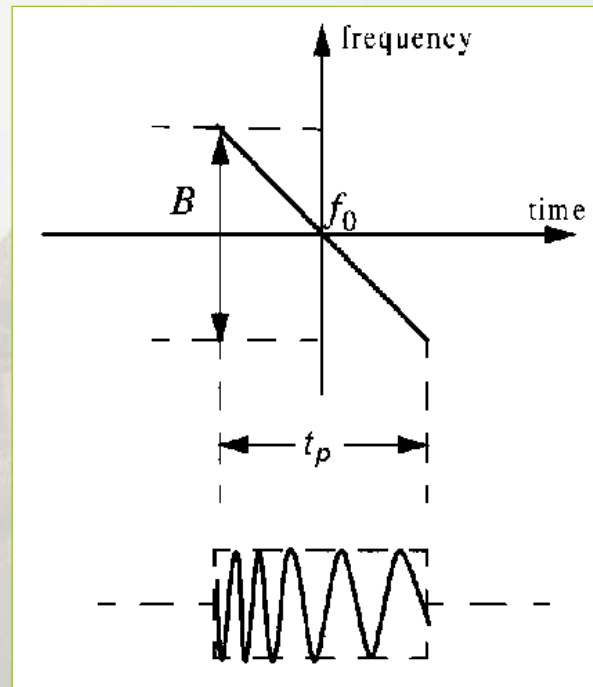
$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{t_p}} \text{rect}\left(\frac{t}{t_p}\right) e^{+j\pi \gamma t^2}$$



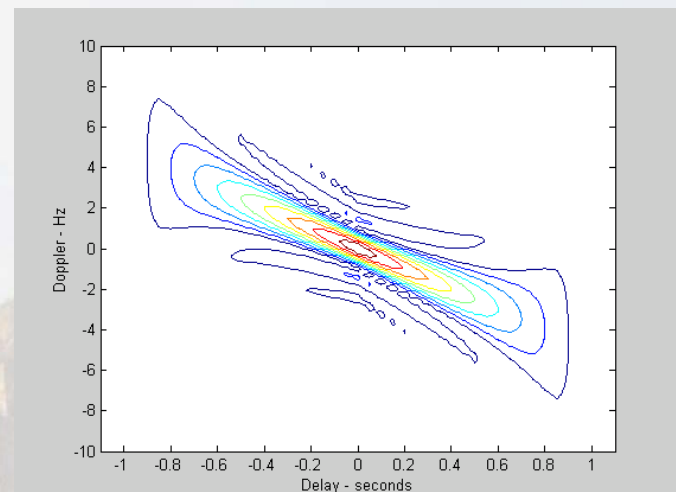
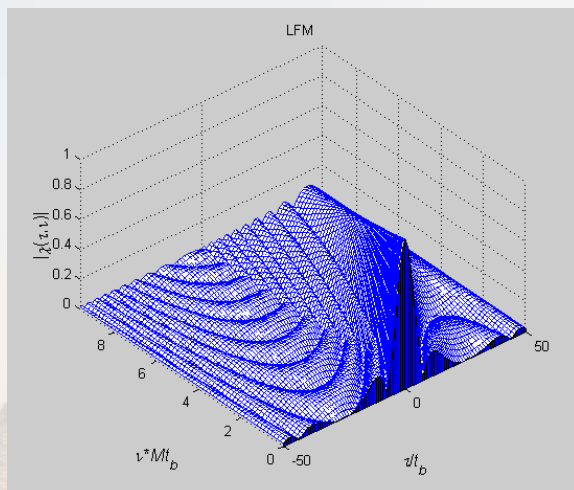
## 向下调频:

$$s(t) = \text{Re}\{u(t)e^{j2\pi f_0 t}\}$$

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{t_p}} \text{rect}\left(\frac{t}{t_p}\right) e^{-j\pi\gamma t^2}$$



## 单个LFM 脉冲的模糊度函数



$$|\chi(\tau, f_d)| = \begin{cases} (1 - \frac{|\tau|}{t_p}) \text{sinc}[\pi t_p (1 - \frac{|\tau|}{t_p})(f_d + \gamma\tau)], & |\tau| \leq t_p \\ 0, & |\tau| > t_p \end{cases}$$

## 距离切片:

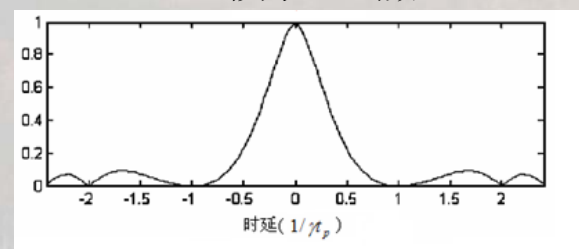
$$\begin{aligned} |\chi(\tau, 0)| &= (1 - \frac{|\tau|}{t_p}) \text{sinc}[\pi t_p (1 - \frac{|\tau|}{t_p}) \gamma \tau] \\ &= (1 - \frac{|\tau|}{t_p}) \text{sinc}[\pi \gamma \tau (t_p - |\tau|)] \\ &= (1 - \frac{|\tau|}{t_p}) \text{sinc}[\pi (\gamma t_p - \gamma \tau) \tau], \quad |\tau| \leq t_p \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \tau / t_p, \\ \beta &= \gamma t_p^2 = B t_p \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |\chi(\tau, 0)| &= (1 - |\alpha|) \text{sinc}[\pi (\gamma \alpha t_p^2 - \gamma \alpha |\alpha| t_p^2)] \\ &= (1 - |\alpha|) \text{sinc}[\pi \beta \alpha (1 - |\alpha|)] \end{aligned}$$

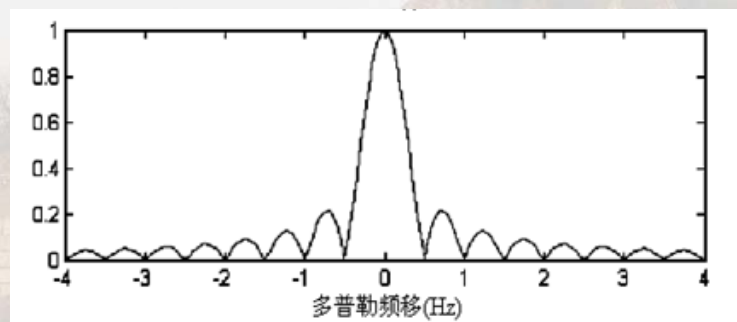
$$|\chi(\tau, 0)| \approx \text{sinc}(\pi \beta \alpha) = \text{sinc}(\pi B \tau)$$

近似为sinc函数

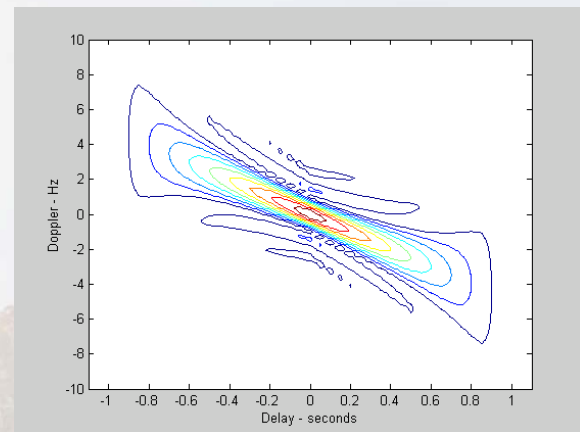
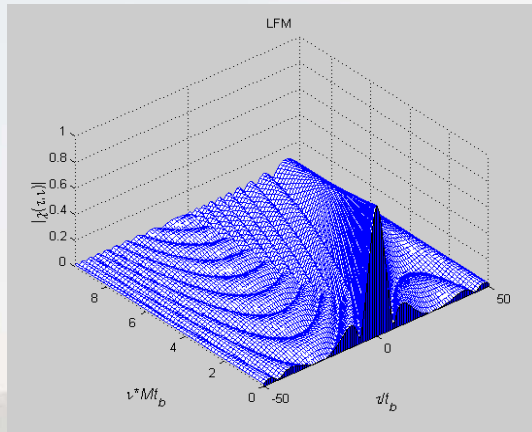


## 多普勒切片:

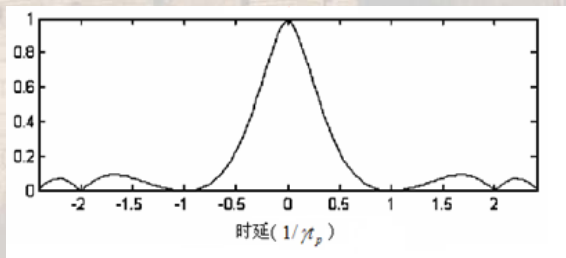
$$|\chi(0, f_d)| = \text{sinc}(\pi f_d t_p)$$



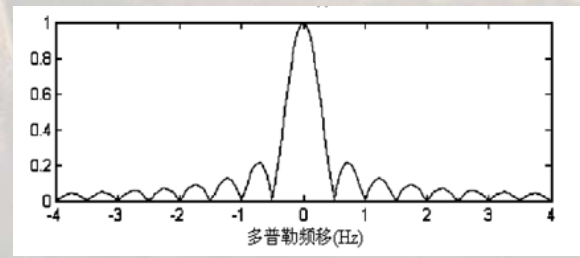




单个LFM脉冲的模糊图



时延（距离）切片



多普勒（速度）切片

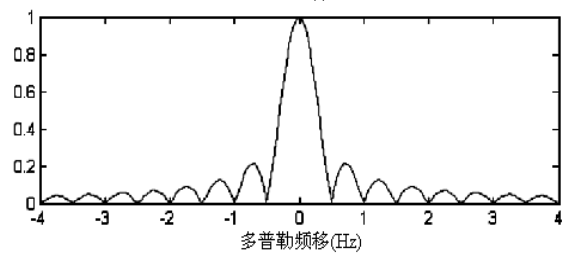
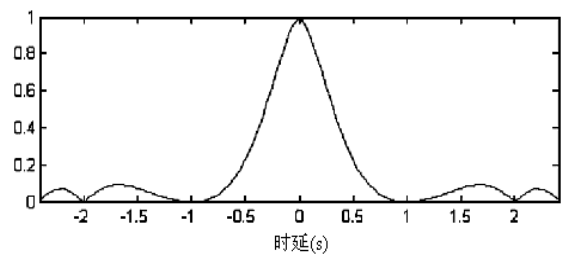
### 距离切片：

$$|\chi(\tau, 0)| \approx \text{sinc}(\pi\beta\alpha) = \text{sinc}(\pi B\tau)$$

### 多普勒切片：

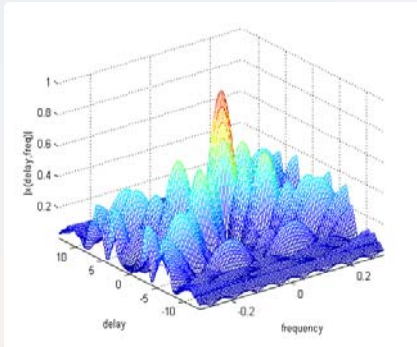
$$|\chi(0, f_d)| = \text{sinc}(\pi f_d t_p)$$

因此，如果采用匹配滤波接收：

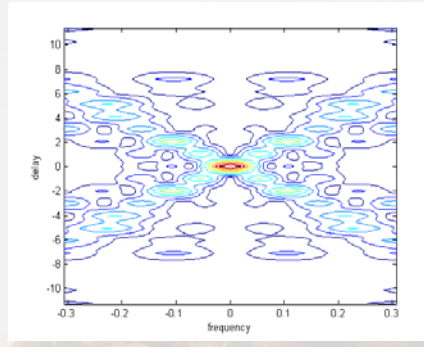


- LFM波形的距离切片近似为sinc函数，其时延（距离）分辨率为 $1/B$ ， $B$ 为调频带宽；
- LFM波形的多普勒切片与单频脉冲的多普勒切片是相同的，仍为sinc函数，其多普勒分辨率为 $1/t_p$ ， $t_p$ 为脉冲持续时间；
- 由于上述特性，LFM波形可以同时兼顾距离和多普勒高分辨率。

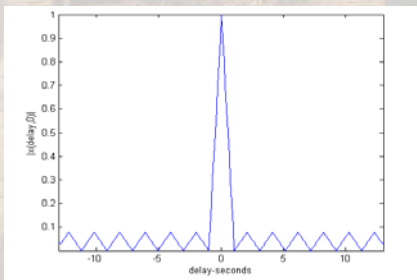
## 13位巴克码



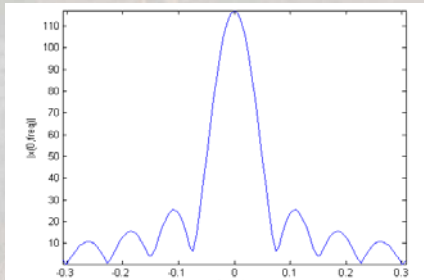
13位巴克码相位编码波形模糊函数图



13位巴克码相位编码波形模糊函数轮廓图



13位巴克码相位编码波形时延切片图

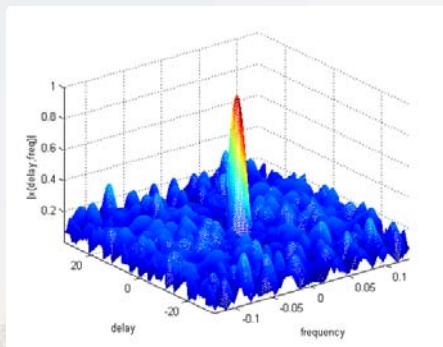


13位巴克码相位编码波形多普勒切片图

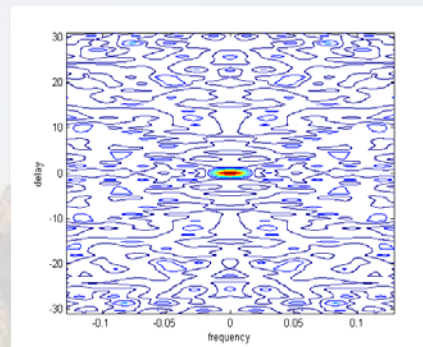
**主要优点：**模糊函数趋向理想的图钉状，有着很高的距离和速度分辨率。不存在速度和距离耦合误差。

**主要缺点：**在强杂波分布的目标环境下基底旁瓣干扰严重。

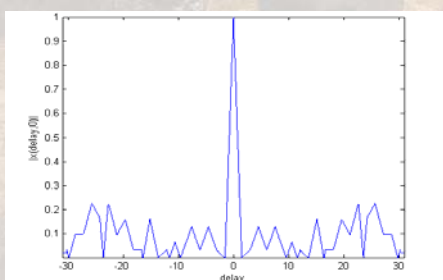
## 31位m序列



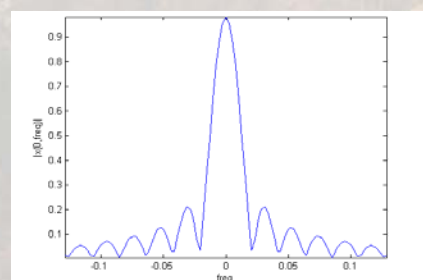
31位m序列相位编码波形模糊函数图



31位m序列相位编码波形模糊函数图



31位m序列相位编码波形时延切片图

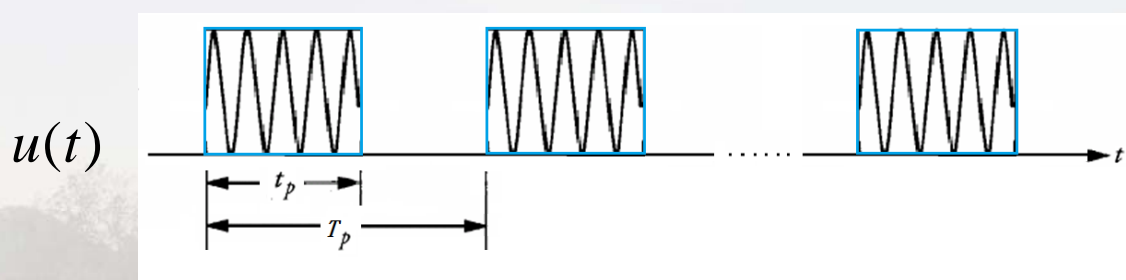


31位m序列相位编码波形多普勒切片图

## 第七讲 雷达波形与处理

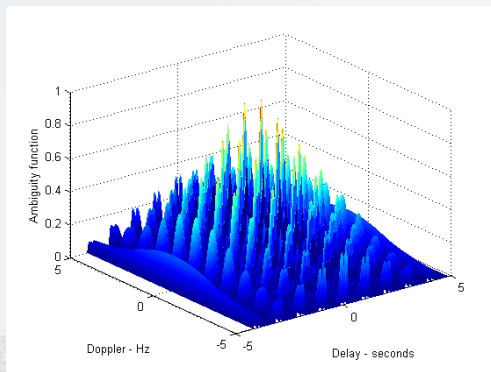
- ❑ 匹配滤波器
- ❑ 雷达模糊度函数
- ❑ 雷达波形与分辨率的概念
- ❑ 典型雷达波形的模糊度函数
- ❑ 脉冲串信号的雷达模糊度函数
- ❑ 数字脉冲压缩
- ❑ 波形分集概念及应用

### 点频调制脉冲串信号的AF

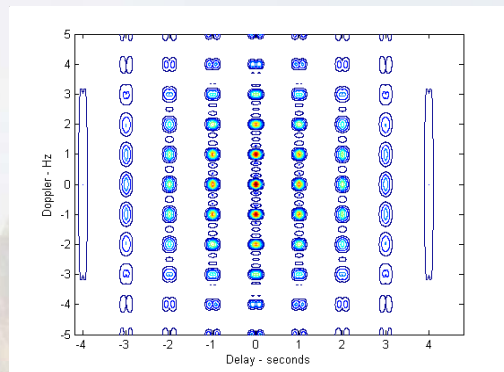


$$\chi(\tau, f_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) u^*(t - \tau) e^{j2\pi f_d t} dt$$

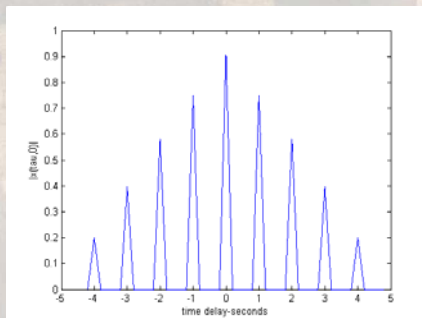




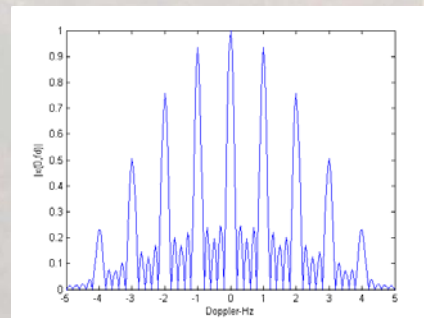
模糊函数图( $N=5, T=0.2, Tr=1$ )



模糊函数轮廓图( $N=5, T=0.2, Tr=1$ )

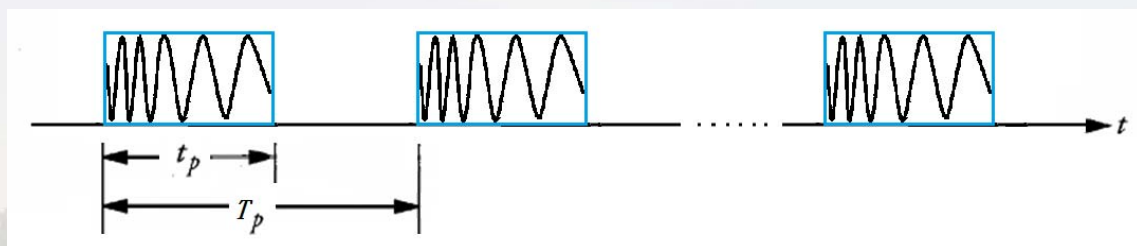


时延切片图( $N=5, T=0.2, Tr=1$ )

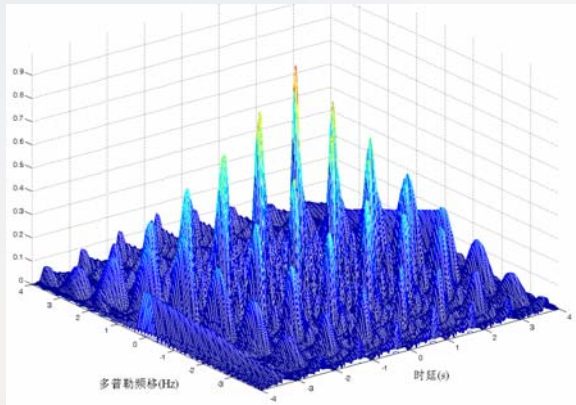


多普勒切片图( $N=5, T=0.2, Tr=1$ )

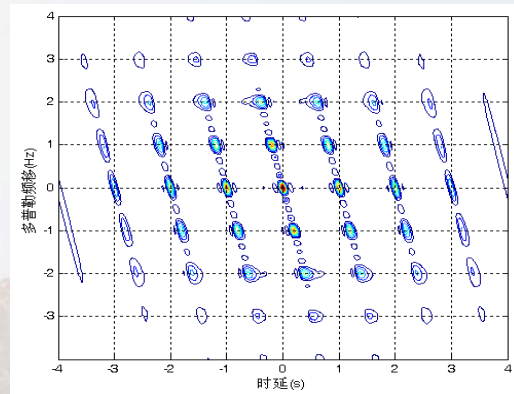
## LFM脉冲串信号



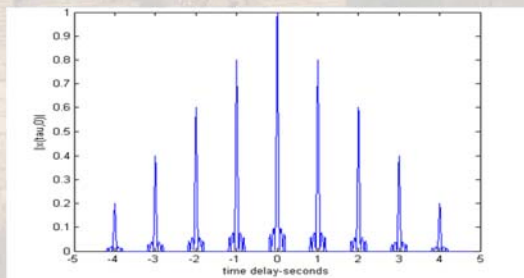
## LFM脉冲串



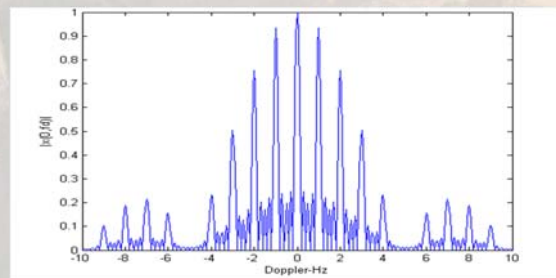
模糊函数图( $N=5, T=0.2, Tr=1, B=50$ )



模糊函数轮廓图( $N=5, T=0.2, Tr=1, B=50$ )

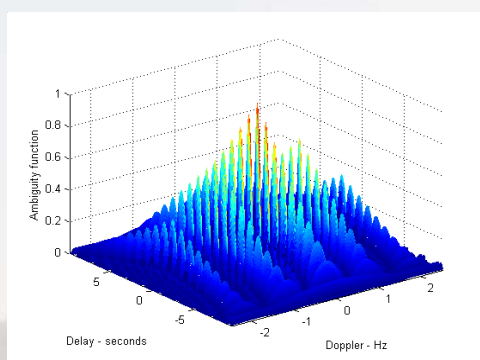


时延切片图( $N=5, T=0.2, Tr=1, B=50$ )

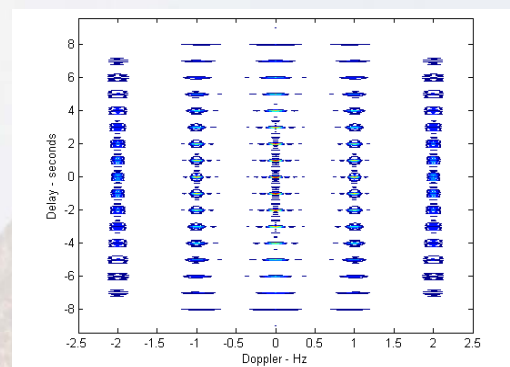


多普勒切片图( $N=5, T=0.2, Tr=1, B=50$ )

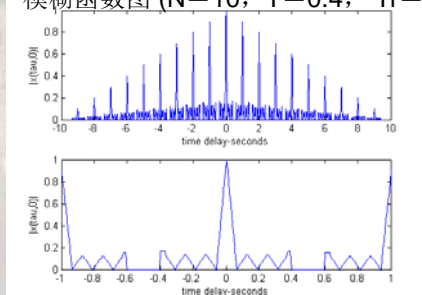
## 7位巴克码脉冲串波形



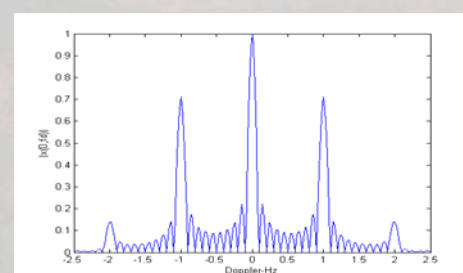
模糊函数图 ( $N=10, T=0.4, Tr=1$ )



模糊函数轮廓图 ( $N=10, T=0.4, Tr=1$ )



时延切片图( $N=10, T=0.4, Tr=1$ )

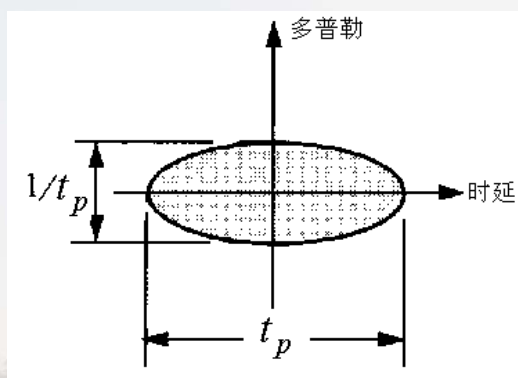


多普勒切片图( $N=10, T=0.4, Tr=1$ )

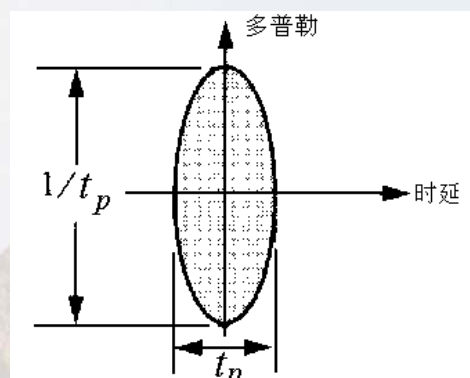
通过对雷达波形（脉冲或脉冲串）模糊度函数的分析，能直接得到什么信息？

### 单个脉冲AF的轮廓图

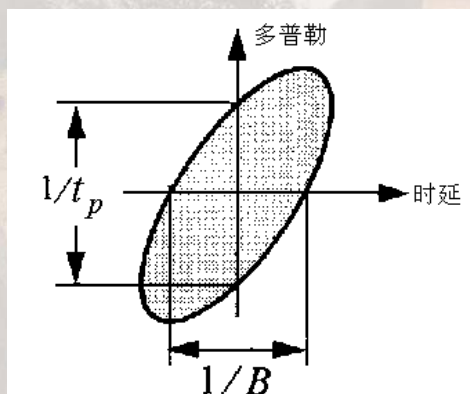
长脉冲



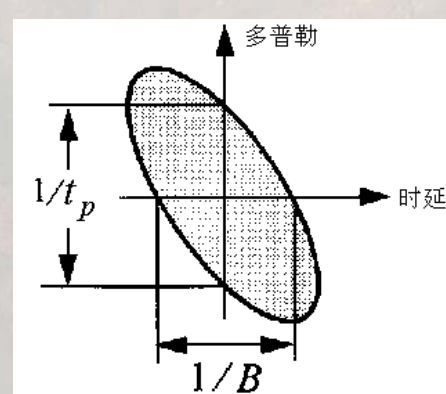
短脉冲



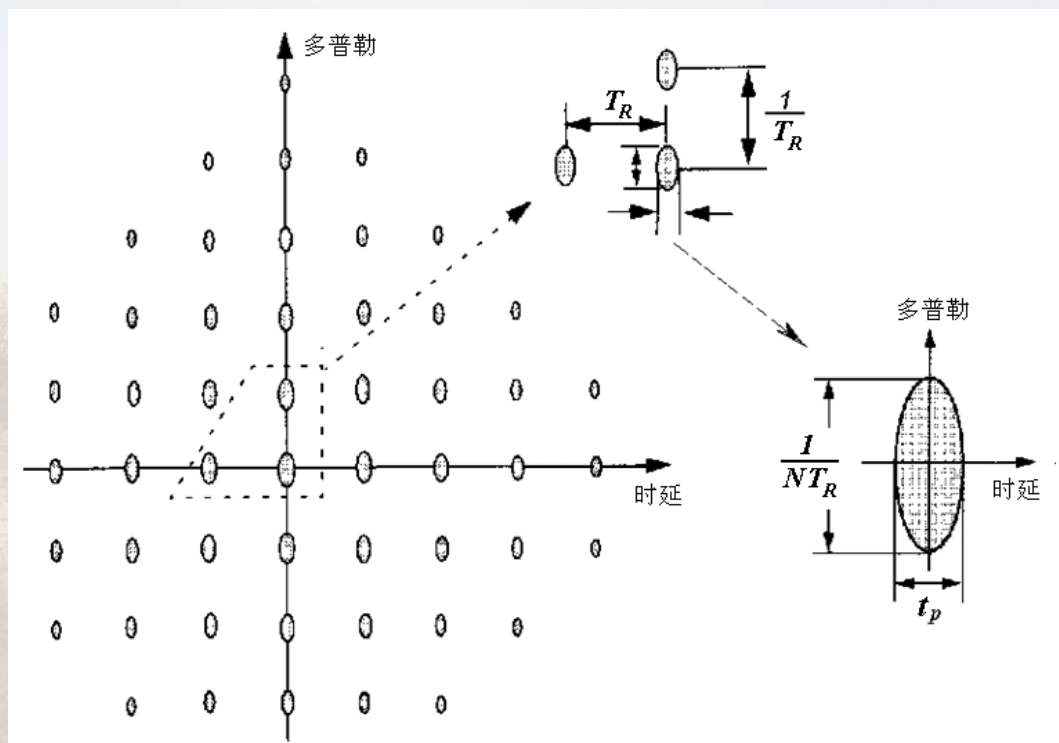
上调频



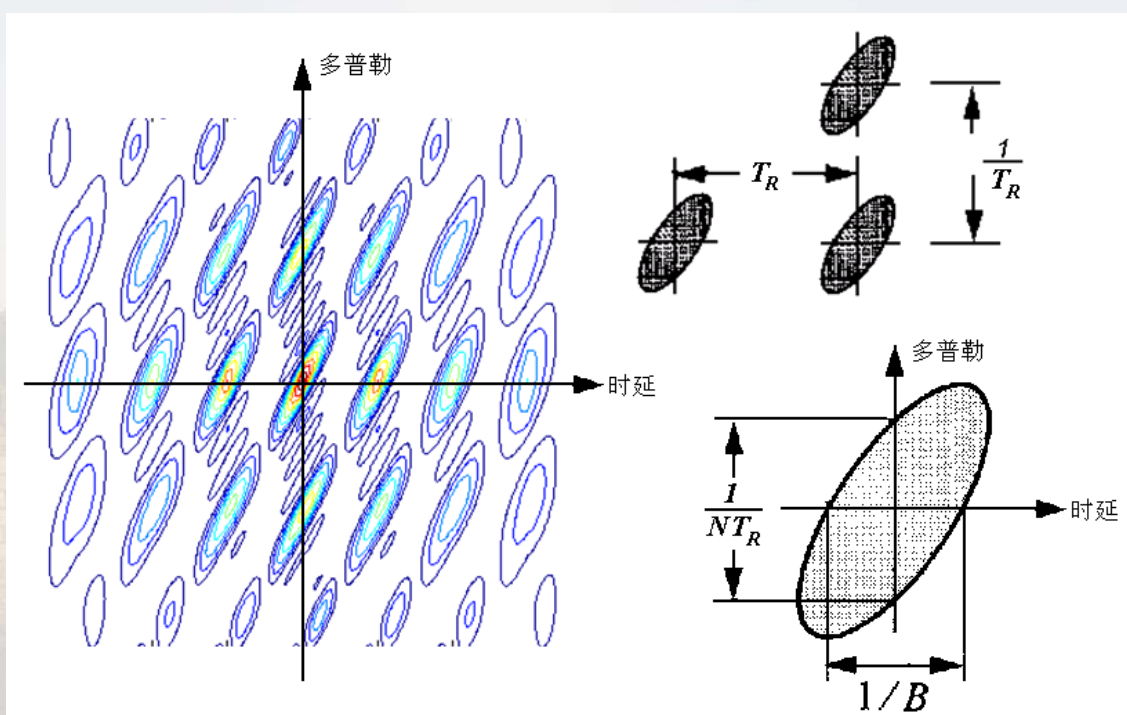
下调频



## 单频脉冲串AF的轮廓图



## LFM脉冲串 AF的轮廓图





所以，通过模糊图可以方便地分析出雷达波形的**距离-多普勒分辨特性**和**距离-多普勒模糊特性**。

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 ( $t_p, B, N, T_R$ )	$\frac{1}{B}$	$T_R$	$\frac{1}{NT_R}$	$\frac{1}{T_R}$

## 第七讲 雷达波形与处理

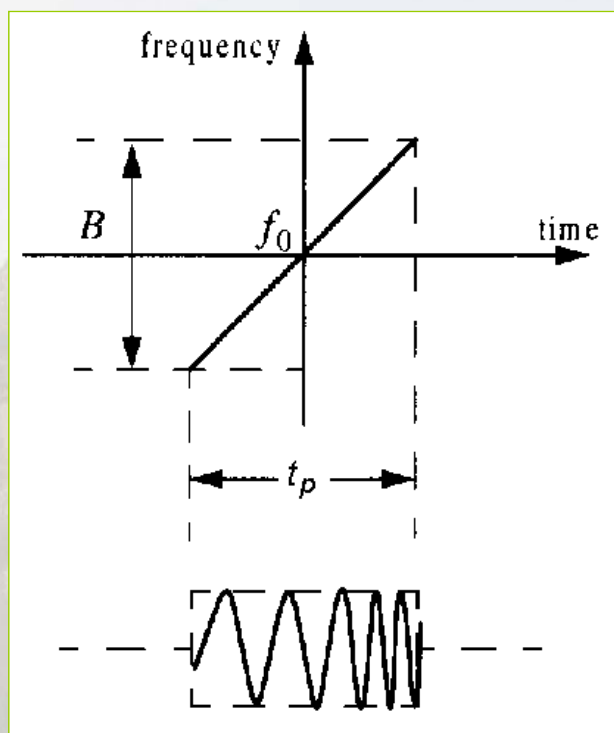
- ❑ 匹配滤波器
- ❑ 雷达模糊度函数
- ❑ 雷达波形与分辨率的概念
- ❑ 典型雷达波形的模糊度函数
- ❑ 脉冲串信号的雷达模糊度函数
- ❑ 数字脉冲压缩
- ❑ 波形分集概念及应用

## 线性调频波 (LFM)

向上调频:

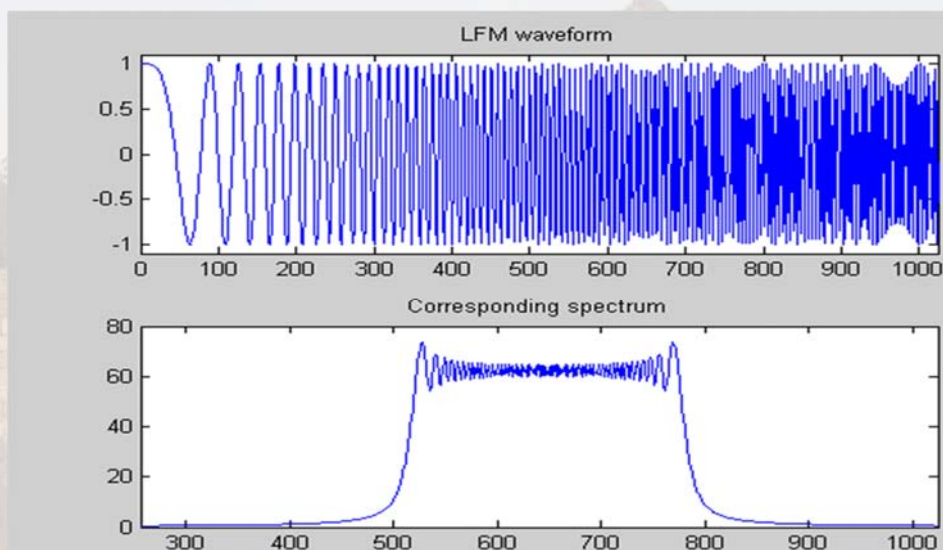
$$s(t) = \text{Re}\{u(t)e^{j2\pi f_0 t}\}$$

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{t_p}} \text{rect}\left(\frac{t}{t_p}\right) e^{+j\pi\gamma^2}$$

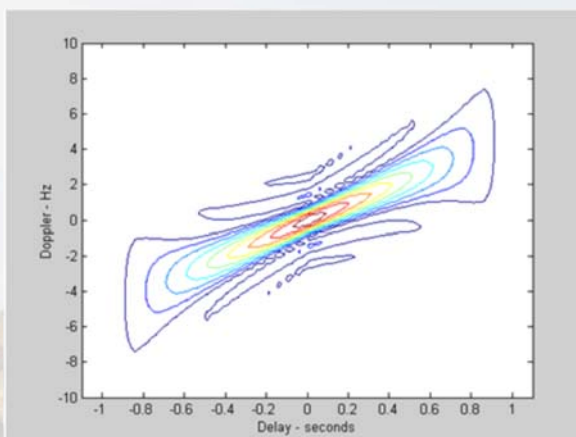
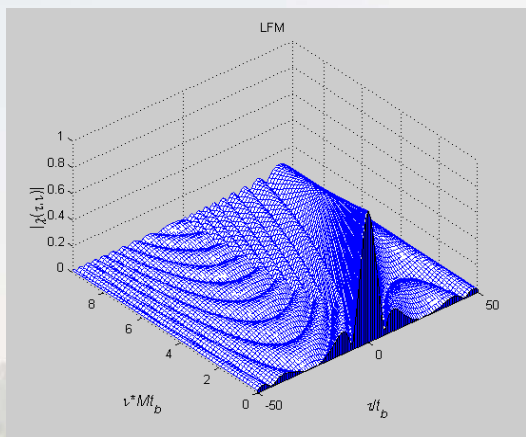


## LFM波的频谱特性

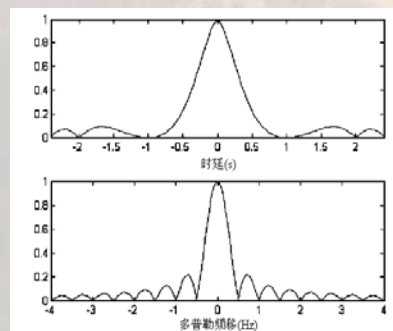
$$S(\omega) = \sqrt{\frac{1}{B}} e^{-j\omega^2 / (4\pi B)} \left\{ \frac{[C_F(x_2) + C_F(x_1)] + j[S_F(x_2) + S_F(x_1)]}{\sqrt{2}} \right\}$$



## 单个LFM 脉冲的模糊度函数



$$|\chi(\tau, f_d)| = \begin{cases} (1 - \frac{|\tau|}{t_p}) \text{sinc}[\pi t_p (1 - \frac{|\tau|}{t_p})(f_d + \gamma\tau)], & |\tau| \leq t_p \\ 0, & |\tau| > t_p \end{cases}$$



## 脉冲压缩的概念

### LFM波形的距离切片

$$|\chi(\tau, 0)| \approx \text{sinc}(\pi\beta\tau) = \text{sinc}(\pi B\tau)$$

发射的LFM脉冲:

脉宽:  $\tau_{input} = t_p$

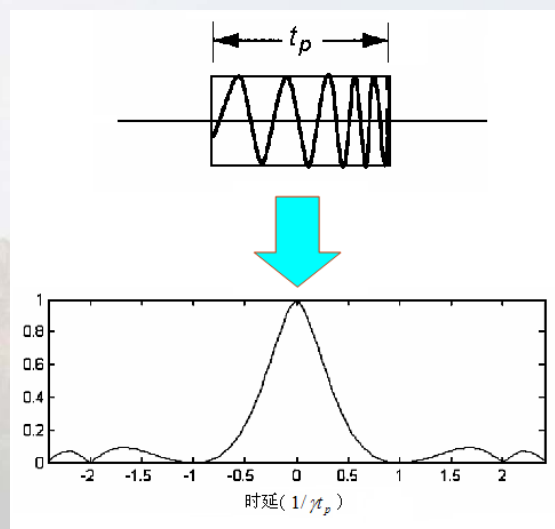
线性调频斜率:  $\gamma$

经匹配滤波接收后的脉冲:

$$\text{等效脉宽: } \tau_{output} = \frac{1}{\gamma t_p} = \frac{1}{B}$$

输入脉宽与输出脉宽两者之比值:

$$\frac{\tau_{input}}{\tau_{output}} = \gamma t_p^2 = B \cdot t_p$$

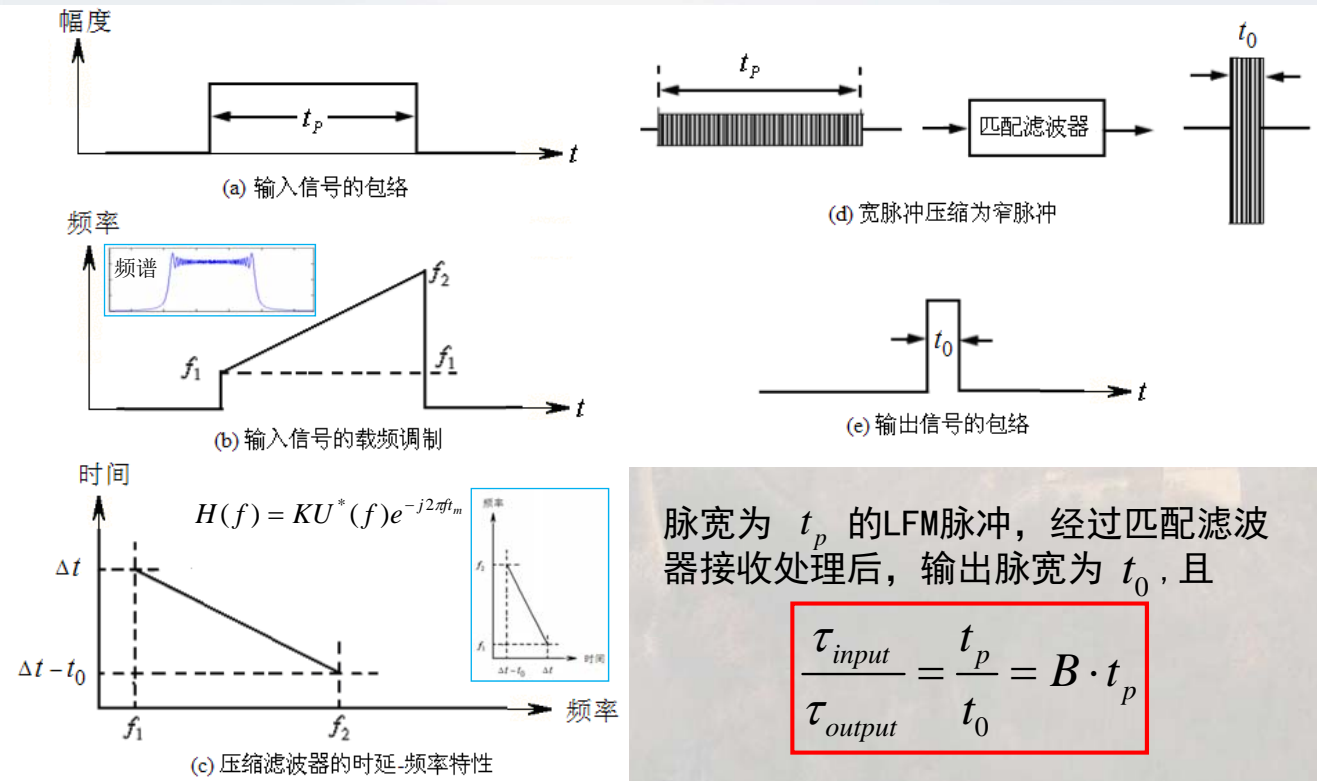


波形的时宽带宽积

相当于脉冲被压缩了  $\beta = B \cdot t_p$  倍!

这就是LFM波脉冲压缩的概念 ---

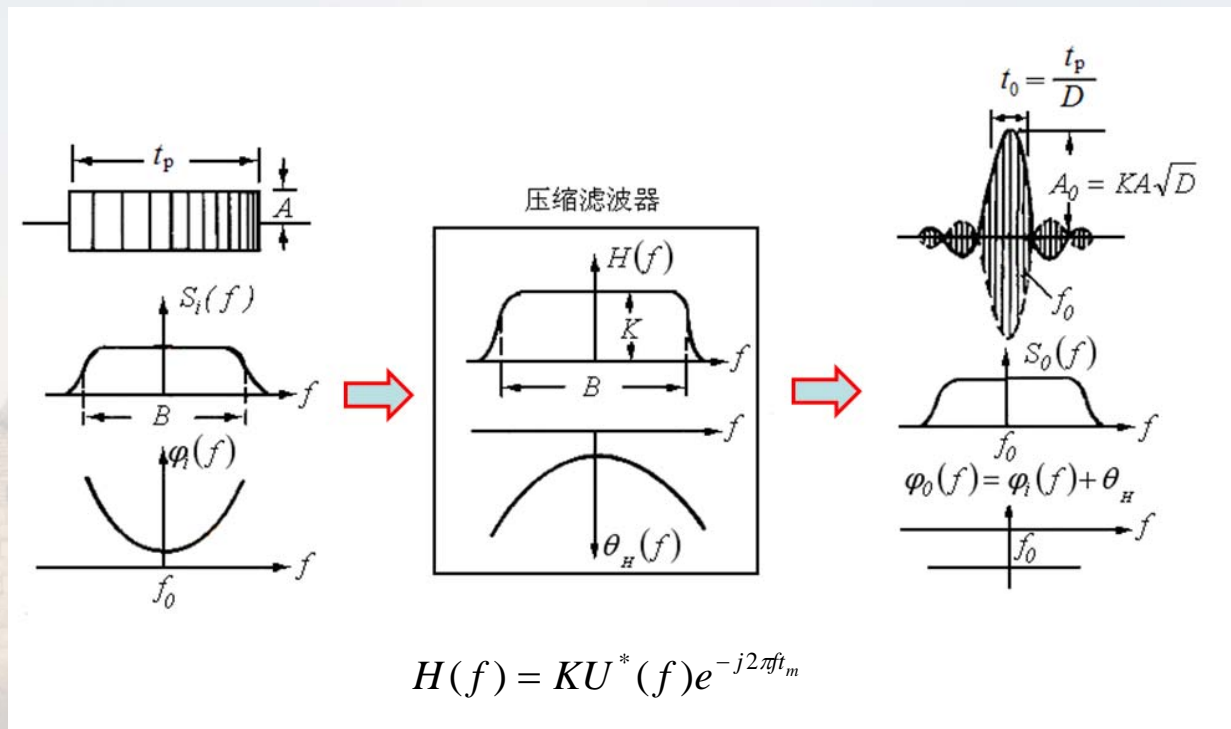
## 脉冲压缩概念示意图



广义地，“脉冲压缩”概念可扩展到任何宽带波形的匹配滤波处理。

Xu: Radar Systems, Chapter-07

## 脉冲压缩的频域解释

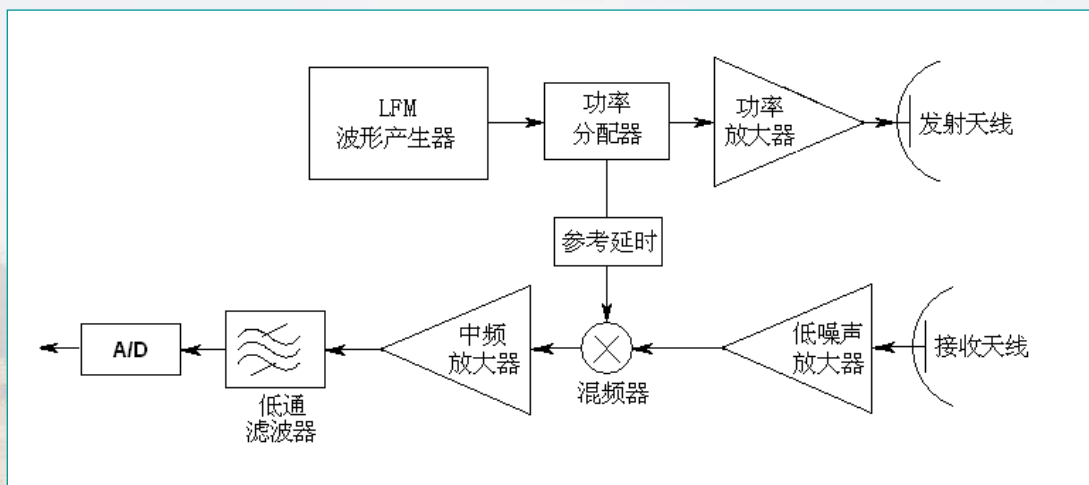


Xu: Radar Systems, Chapter-07

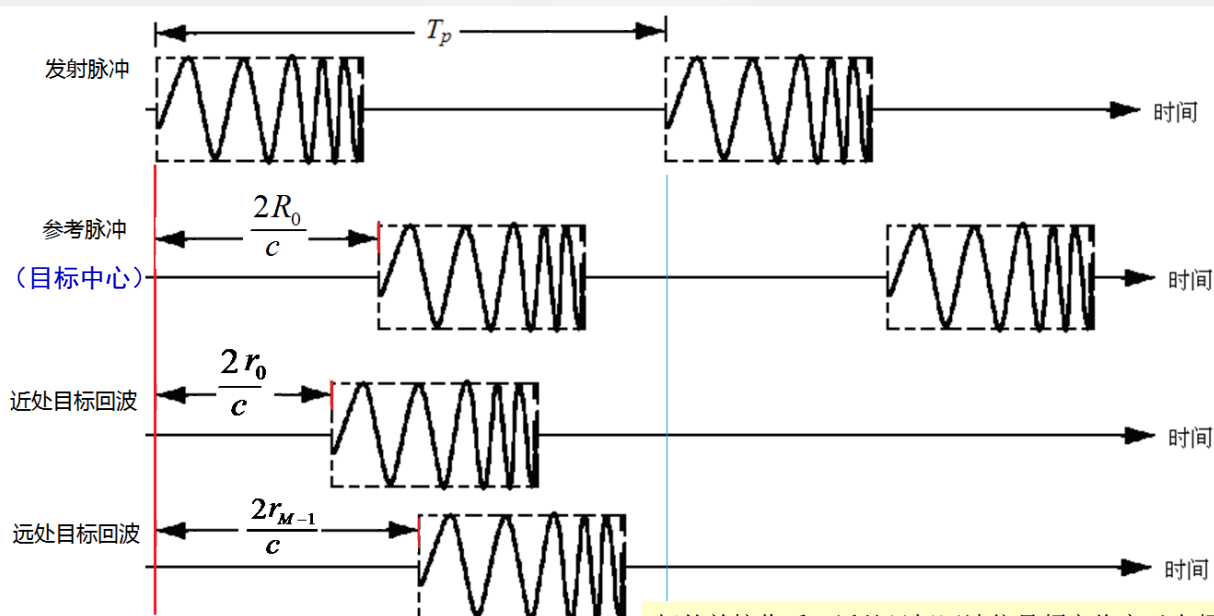
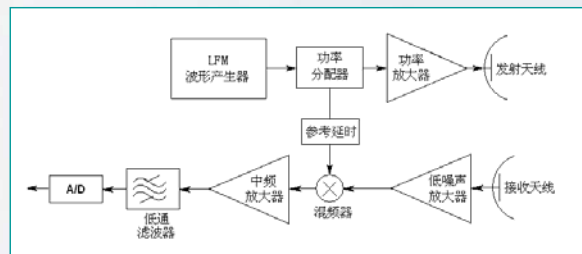
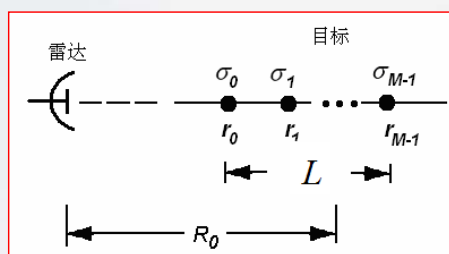


## LFM雷达是如何实现“脉冲压缩”的？

LFM雷达原理框图



- ❑ 自差拍 (homodyne) 或超外差 (heterodyne) 接收
- ❑ 去倾斜处理 (相位补偿)
- ❑ 快速傅立叶变换



超外差接收后，近处目标回波信号频率将高于中频频率，而远处目标回波信号频率将低于中频频率



## 峰值旁瓣电平 (PSL) :

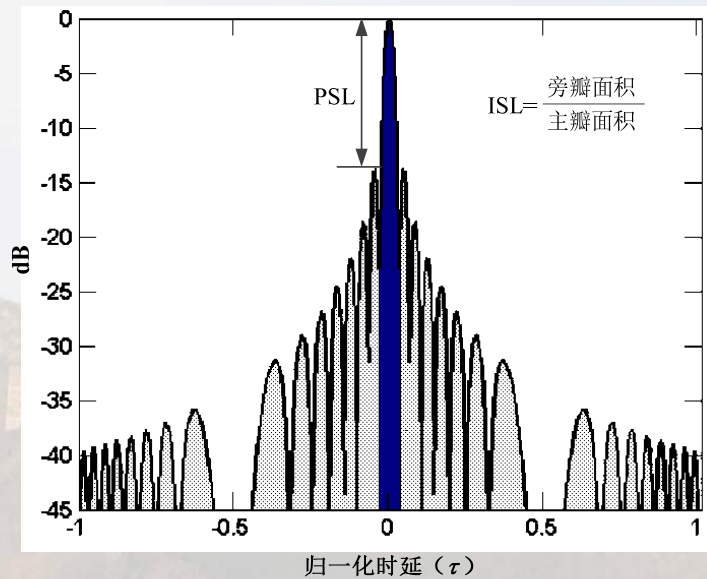
$$Q_{PSL}(\chi(\tau, 0)) = \max_{\tau \in [\tau_{\min}, T]} \left\{ \left| \frac{\chi(\tau, 0)}{\chi(0, 0)} \right|^2 \right\}$$

峰值旁瓣电平反映了一个静止点目标的响应干扰位于其邻近的另一个静止点目标响应的程度。

## 积分旁瓣电平 (ISL) :

$$Q_{ISL}(\chi(\tau, 0)) = \frac{\int_{\tau_{\min}}^T |\chi(\tau, 0)|^2 d\tau}{\int_0^{\tau_{\min}} |\chi(\tau, 0)|^2 d\tau}$$

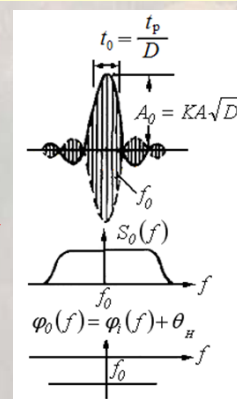
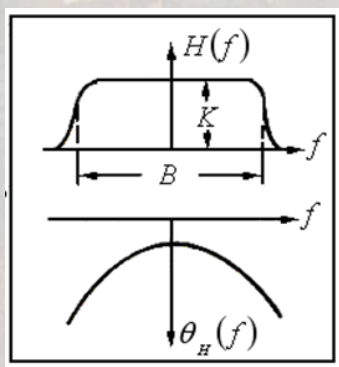
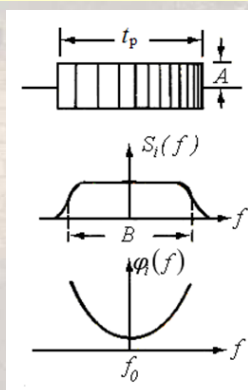
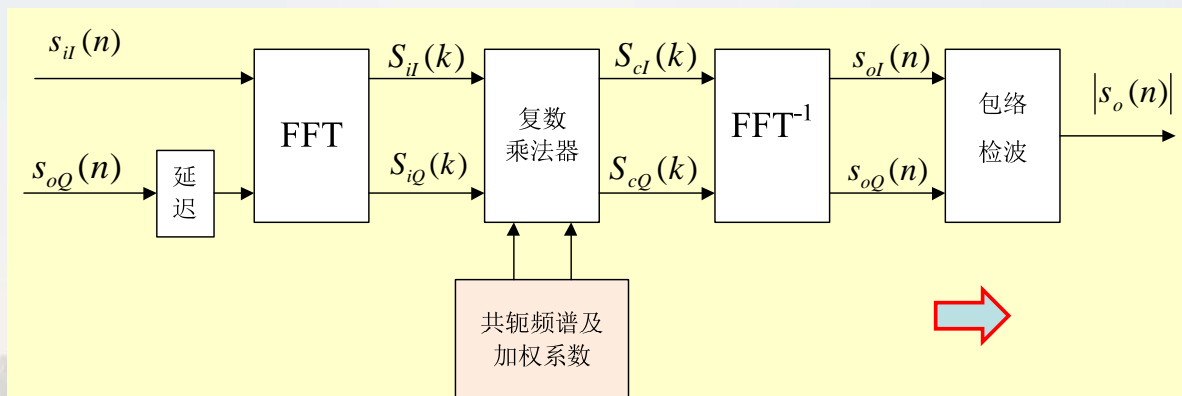
积分旁瓣电平准则对于评价点目标受分布式散射体（例如杂波）影响的程度尤其重要。



## 典型雷达波形及其基本特性总结

雷达波形	主要特性
线性调频 (LFM)	易于产生和处理；大带宽；高峰值旁瓣电平。
非线性调频 (NLFM)	以降低LFM波的分辨率为代价，获得更低的旁瓣电平。
相位编码	易于波形优化；具有二相或多相码子类。
频率编码	调制于不同的子载波；高调幅效应。
噪声雷达	非重复性的连续波（随机信号）；高调幅效应；低可截获（LPI）波形；接收处理相对复杂。
超宽带 (UWB)	极窄脉冲；极宽带宽；超高分辨率；能量极大受限。

## 数字脉冲压缩

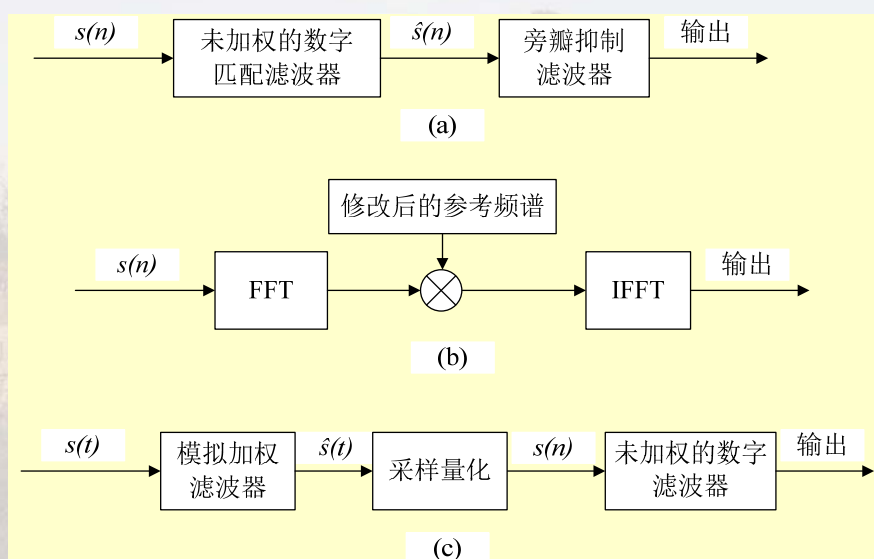


Xu: Radar Systems, Chapter-07

39

## 旁瓣抑制技术 -- 加权处理

加权处理是压缩后脉冲旁瓣抑制的有效方法。所谓“加权”，就是将匹配滤波器的频率响应乘上某些适当的“窗函数”，通常为锥形窗。

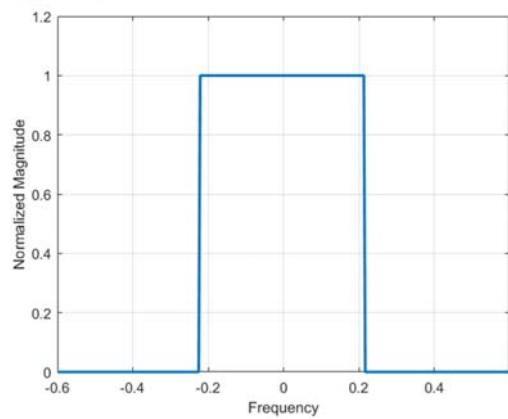


三种可能的方法：相互等效

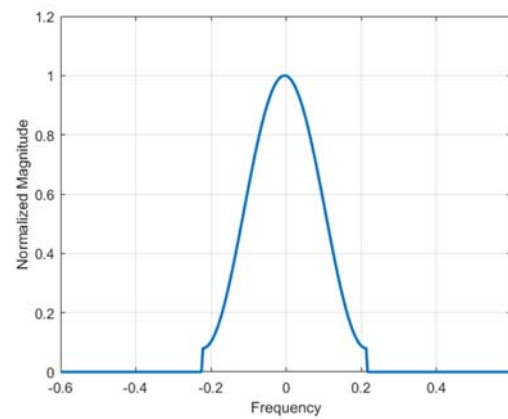
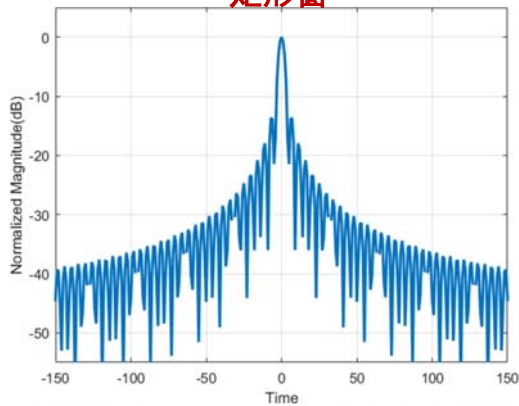
Xu: Radar Systems, Chapter-07

40

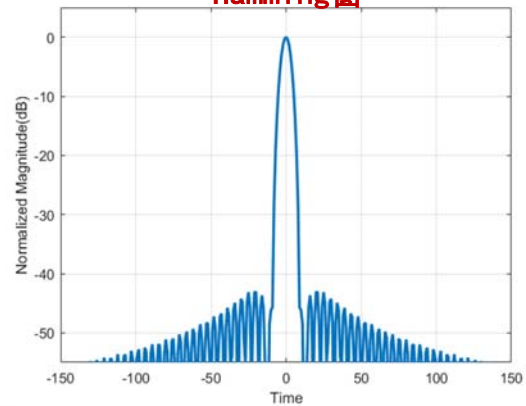




矩形窗



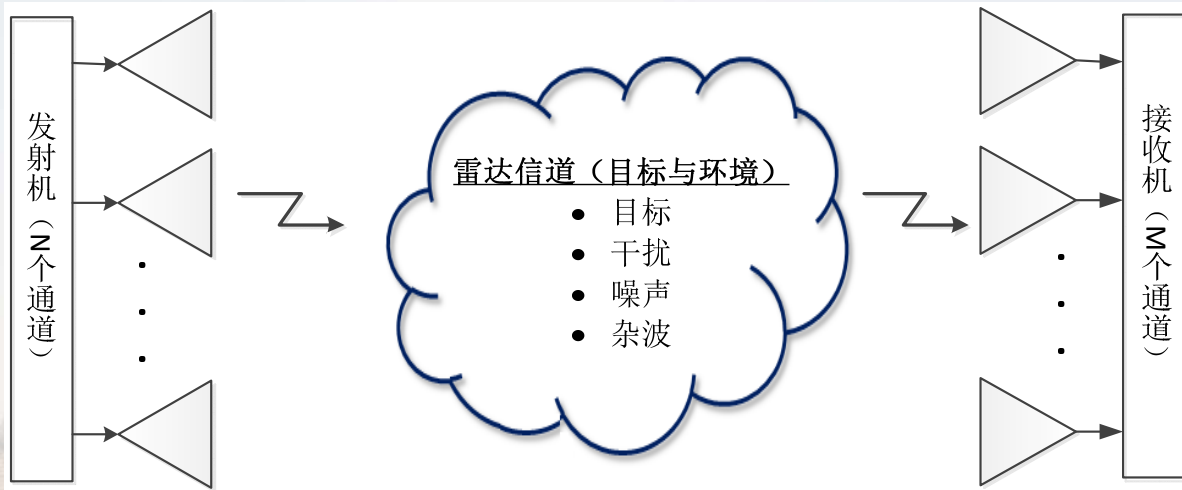
Hamming窗



## 第七讲 雷达波形与处理

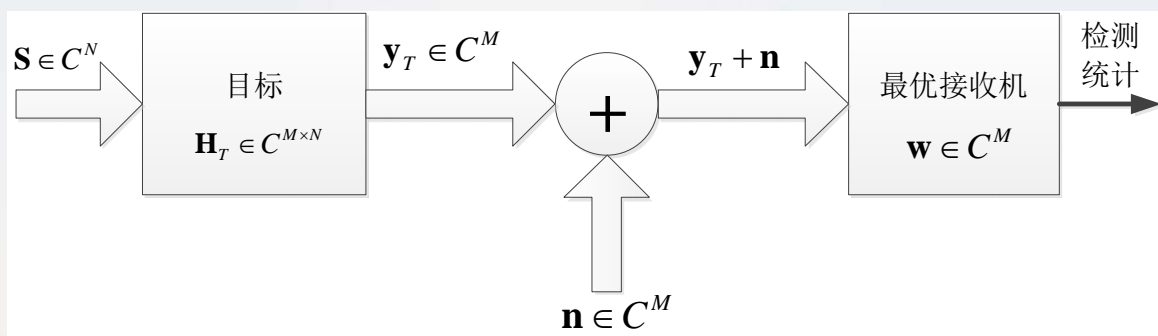
- ❑ 匹配滤波器
- ❑ 雷达模糊度函数
- ❑ 雷达波形与分辨率的概念
- ❑ 典型雷达波形的模糊度函数
- ❑ 脉冲串信号的雷达模糊度函数
- ❑ 数字脉冲压缩
- ❑ 波形分集概念及应用

## 波形分集：概念



- 根据IEEE雷达术语标准686-2017给出的定义，波形分集指根据特定场景和任务需求，对波形以适应性 (Adaptivity) 的方式进行动态优化以使雷达的性能达到最佳
- 这种适应性也可以同其他域联合使用，包括天线辐射方向图（含发射与接收）、时域、频域、编码域以及极化域等
- 波形分集技术发展到今天，还包括用于此类波形的自适应接收处理

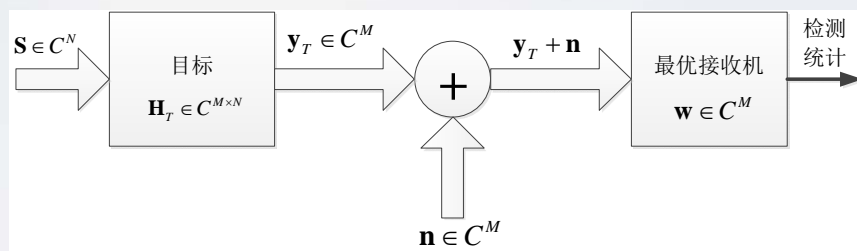
## 波形分集：抗干扰



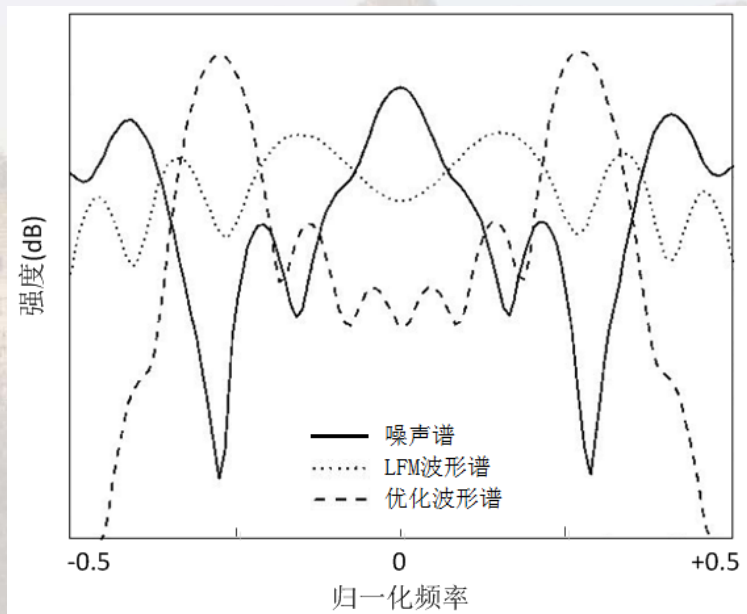
### 核心思想 —— 信干噪比最大化：

根据目标的响应特性、干扰与噪声特性、以及其他附加约（例如波形的调制方式幅度或能量等约束）条件，使得SINR最大化。

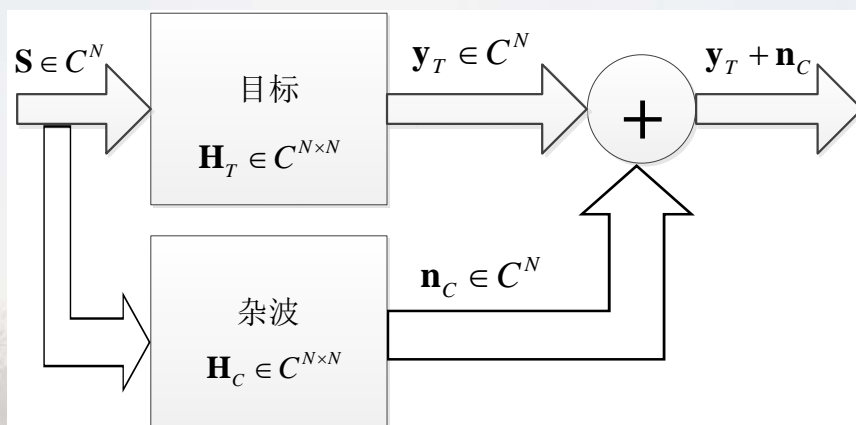
Maximize: 
$$\text{SINR} = \frac{\mathbf{y}_T^H \mathbf{y}_T}{E\{\mathbf{n}^H \mathbf{n}\}}$$



示例:



## 波形分集：杂波抑制



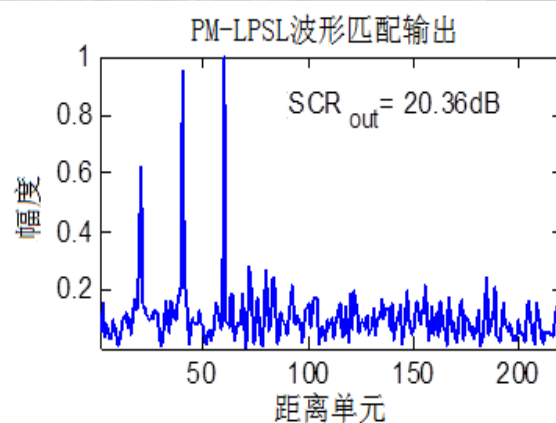
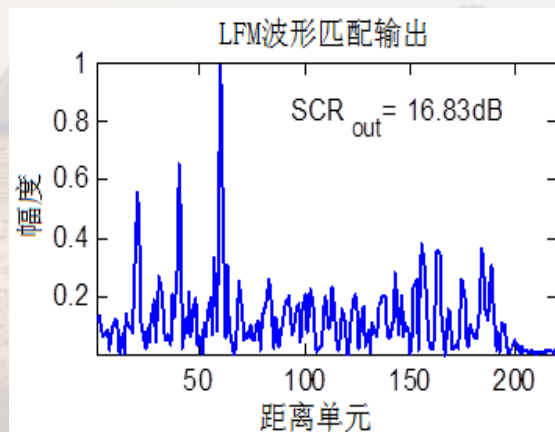
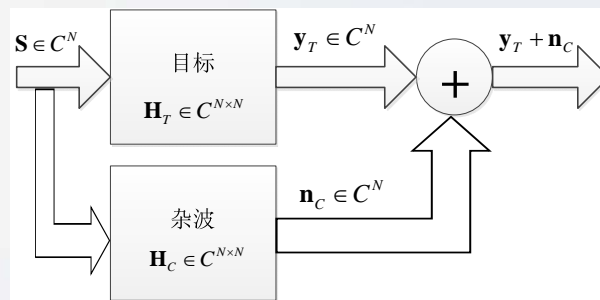
注意到噪声干扰是同雷达发射波形无关的，而杂波干扰则是同雷达发射波形相关的。因此，此处的波形优化信号模型有所不同。

### 核心思想 —— 信杂比最大化：

相比于SINR最大化波形优化问题，此处问题的复杂性在于目标与杂波响应特性均与雷达发射波形（优化求解量）是相关的，进而导致问题求解思路的差异。

**Maximize:** 
$$\text{SCR} = \frac{\mathbf{y}_T^H \mathbf{y}_T}{E\{\mathbf{n}_C^H \mathbf{n}_C\}}$$

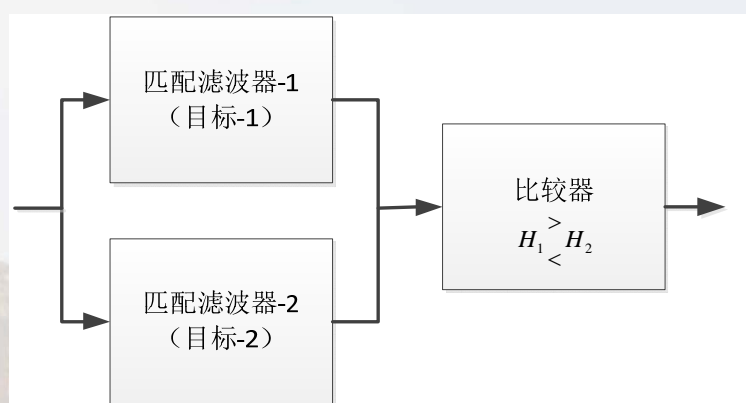
示例：



## 波形分集：目标识别

二元假设问题：

$$\begin{cases} \text{目标-1: } H_1: \mathbf{y}_1 + \mathbf{n} = \mathbf{H}_{T1}\mathbf{S} + \mathbf{n} \\ \text{目标-2: } H_2: \mathbf{y}_2 + \mathbf{n} = \mathbf{H}_{T2}\mathbf{S} + \mathbf{n} \end{cases}$$

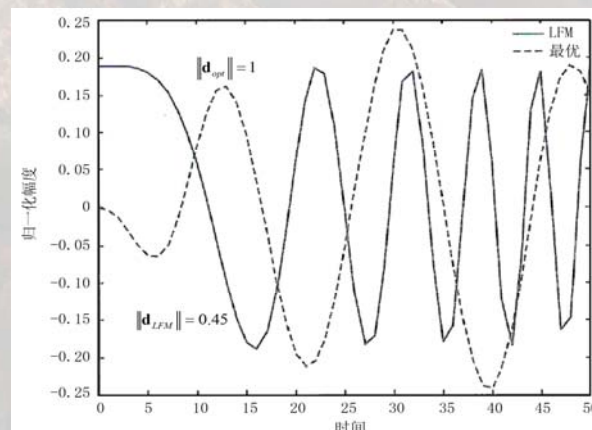
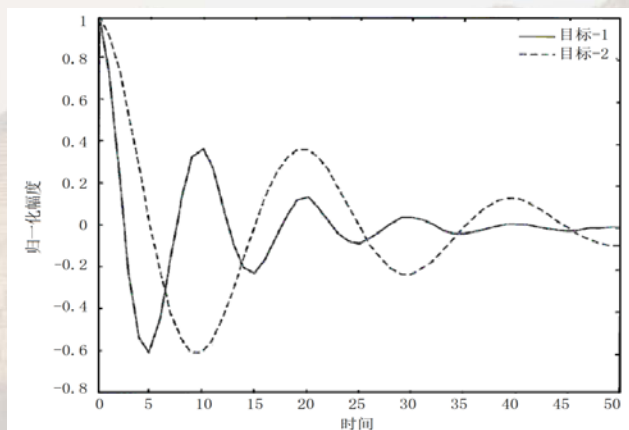
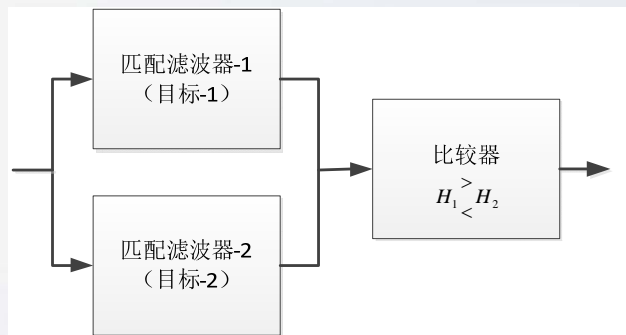


核心思想 - 不同目标的类间距离最大化：

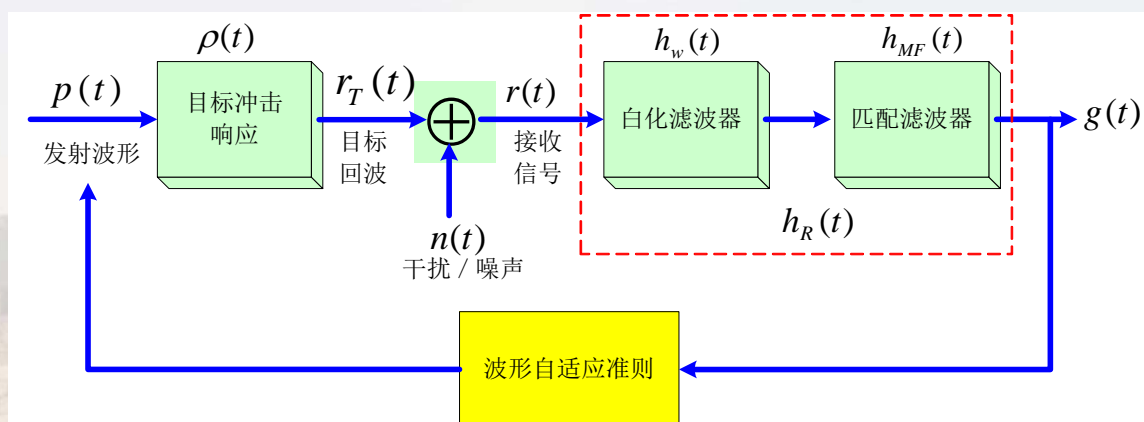
Maximize:  $\mathbf{d} = \|\mathbf{y}_1 - \mathbf{y}_2\|$



示例:



## 智能感知（认知）雷达：波形优化与智能化处理



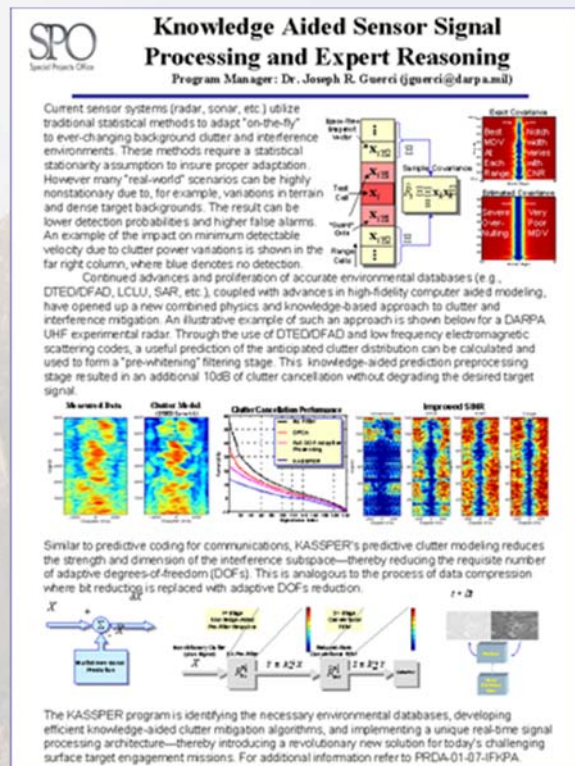
发射和接收自适应处理雷达原理示意图

## KASSPER: 知识辅助的传感器信号处理与专家推理 (DARPA-SPO: 2003.11)

When operating in complex clutter environments potentially encountered in modern military applications, current Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (ISR) Ground Moving Target Indicator (GMTI) and Synthetic Aperture Radar (SAR) sensor performance may fall significantly short of expectations based on typical benign test environments. These operational environs typically contain one of more of the following effects:

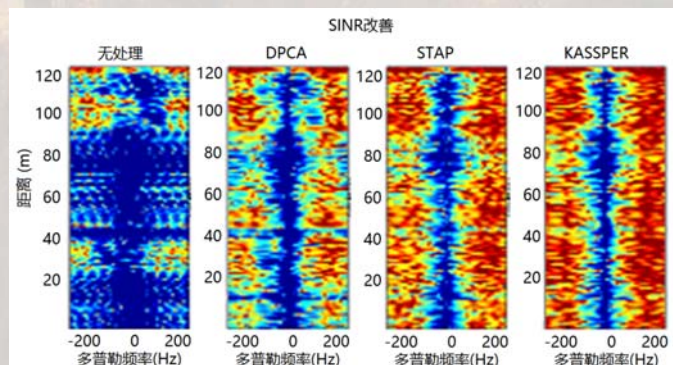
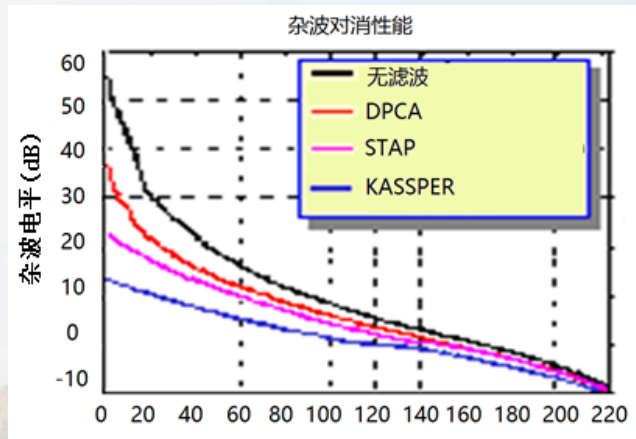
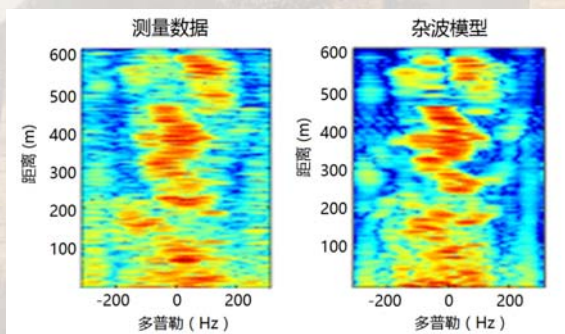
- (1) Complex heterogeneous clutter
- (2) Dense target backgrounds (military and/or civilian)
- (3) Urban and littoral clutter plus other large clutter discretely
- (4) Nonstationary clutter loci arising from bistatic, multistatic and other advanced applications and concepts.

Xu: Radar Systems, Chapter-07



51

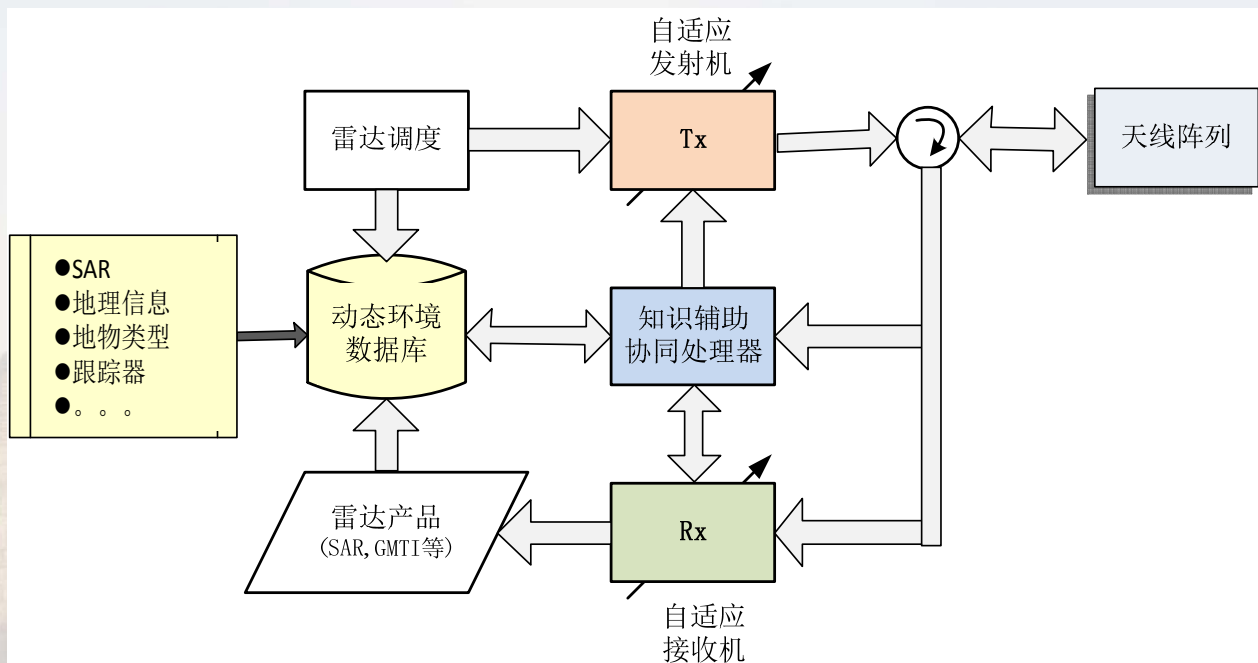
**知识辅助的传感器信号处理与专家推理**通过杂波预测模型的应用，减小了杂波/干扰子空间的维度和强度，由此减小了STAP处理的自由度，从而可提高杂波/干扰对消处理性能。



Xu: Radar Systems, Chapter-07

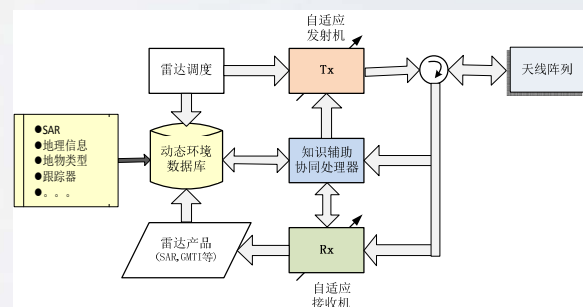
52

## 认知雷达：知识库辅助的全自适应雷达



(事实上，未来雷达甚至天线阵列也可以是自适应的！)

**J. R. Guerri**, Cognitive Radar: the Knowledge-Aided Fully Adaptive Approach, Norwood MA: Artech House Inc., 2010



格西在其著作中把认知雷达定义为具有知识库辅助的全自适应雷达，其**核心**包括以下几方面：

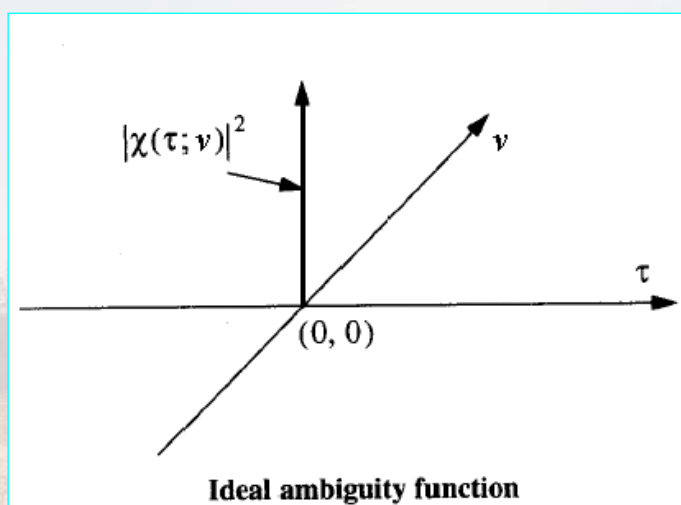
- ❑ **动态环境数据库**：根据离线和在线环境数据源随时更新，例如，可包括（但不限于）地理信息、地物信息、数字高程图、合成孔径雷达(SAR)图像、地面运动目标指示(GMTI)跟踪器等；
- ❑ **知识辅助协同处理器**：除了完成知识辅助的专家推理与决策外，还用于指导发射机和接收机的自适应调节；
- ❑ **自适应发射机**：不但拥有自适应接收机，而且拥有自适应发射机，可根据知识辅助协同处理器的指令生成或选择最优发射波形。现代有源相控阵(AESA)雷达和“数字前端”的诞生简化了自适应发射机的工程实现；
- ❑ **雷达调度**：与动态环境数据库及知识辅助协同处理器保持通信，以预见性地提供必要的信息，补偿数据库调用可能的延时效应。



# 讨 论

从目标两维分辨的角度考虑，什么样的模糊函数是最理想的？它对应于什么样的雷达信号波形？

## 理想AF



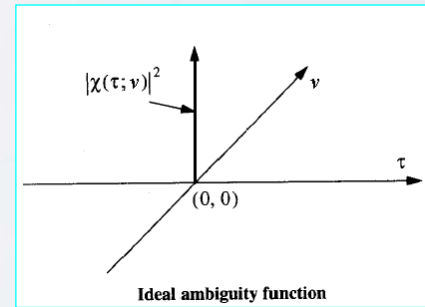
- 两维 $\delta(\tau, \nu)$ 函数
- 距离切片 $\delta(\tau)$
- 多普勒切片 $\delta(\nu)$
- 没有距离&多普勒模糊

它对应于什么样的信号波形？



### 距离切片(波形的ACF) 为 $\delta(\tau)$ :

- 冲击脉冲 $\delta(t)$
- 高斯白噪声: PSD为常数, ACF为 $\delta(\tau)$
- 超宽带**脉冲信号, 经脉冲压缩后可等效为极窄脉冲, 接近于 $\delta(\tau)$



### 多普勒切片为 $\delta(\nu)$

- 连续波(CW): 持续时间无限长, 对应的多普勒分辨率无限高-- $\delta(\nu)$
- 高斯白噪声: 持续时间无限长
- 无限长**脉冲串: AF非单峰, 有模糊

### 两维 $\delta(\tau, \nu)$ 函数

- 冲击脉冲串: 无法真正实现, 且存在距离与多普勒模糊问题
- 超宽带脉冲串: 可实现距离-多普勒两维高分辨, 但存在距离与多普勒模糊
- 高斯噪声调制脉冲串: 可实现距离-多普勒两维高分辨, 不存在距离与多普勒模糊, 但存在其他系统可实现性问题(例如需要采用相关接收机)。

从目标两维分辨的角度考虑, 什么样的模糊函数是最理想的? 它对应于什么样的雷达信号波形?

**没有最理想(不切实际!), 只有更理想(具有大时宽带宽积的雷达波形!)**

## 雷达波形与处理：小结

## 雷达波形的模糊度函数

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

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。

作用：

- 分析波形的距离-多普勒分辨特性
- 分析波形的距离-多普勒模糊特性

## 雷达对目标的两维分辨率

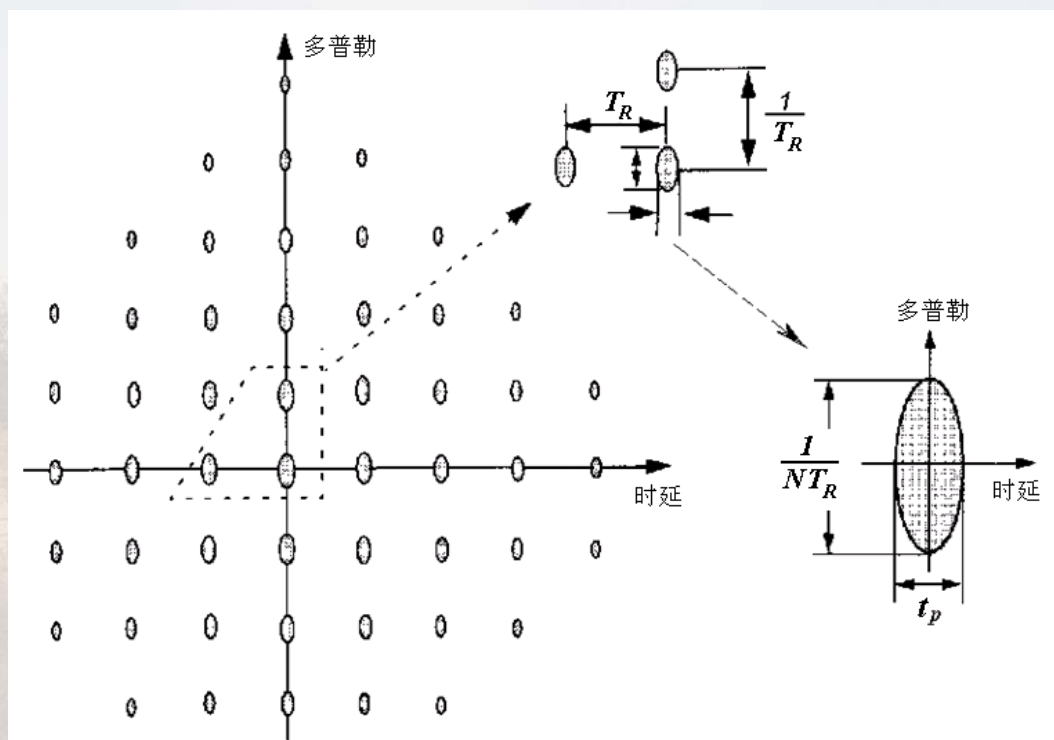
$$\delta_r = \frac{c}{2B}$$

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！

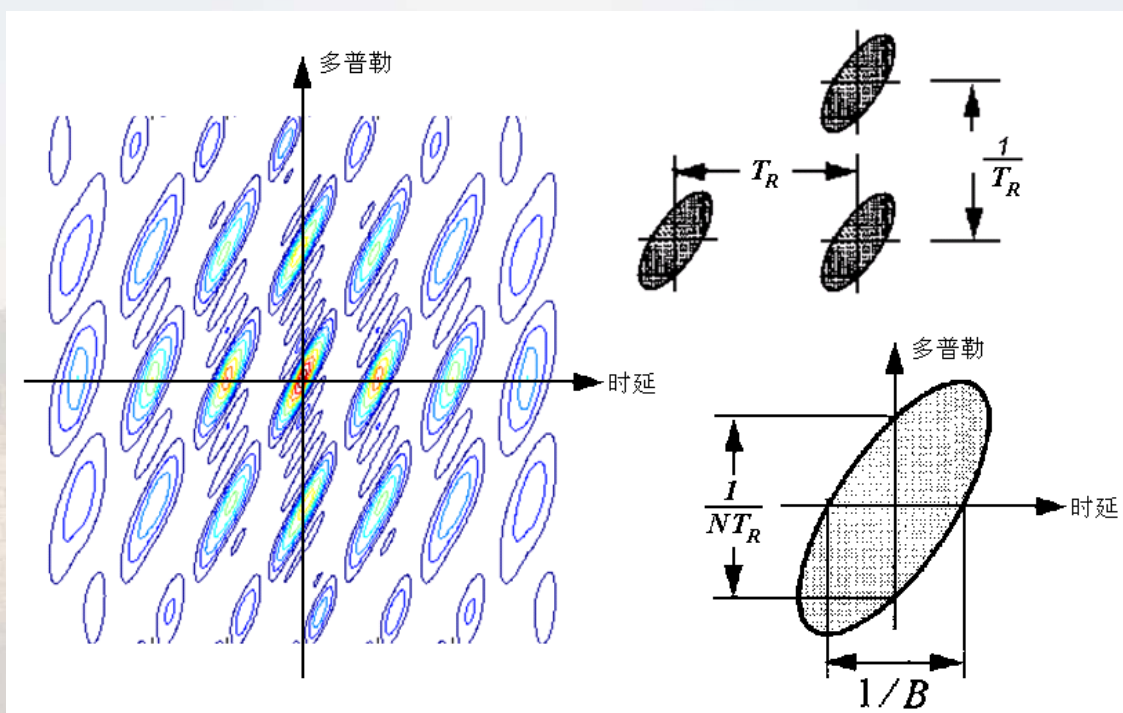
$$\delta_{cr} = \frac{\lambda}{2\Delta\theta_m}$$

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！

## 单频脉冲串AF的轮廓图



## LFM脉冲串 AF的轮廓图

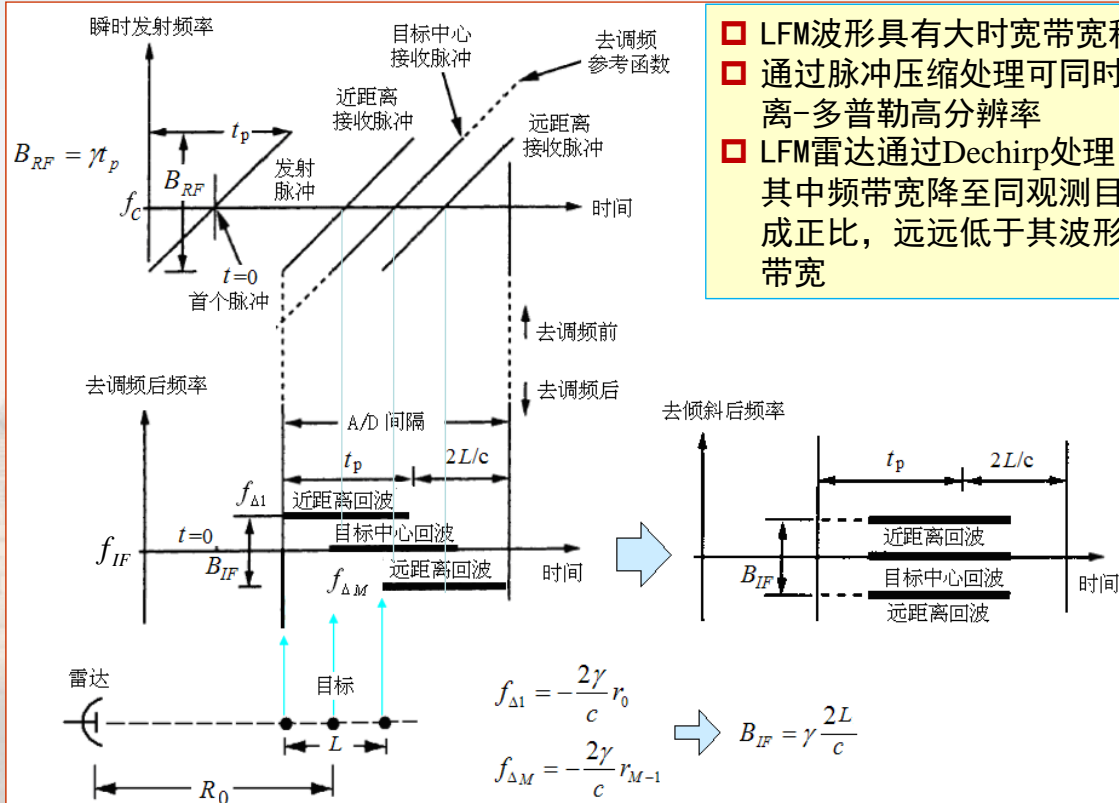


## 几种典型雷达波形的分辨与模糊特性总结

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 ( $t_p, B, N, T_R$ )	$\frac{1}{B}$	$T_R$	$\frac{1}{NT_R}$	$\frac{1}{T_R}$

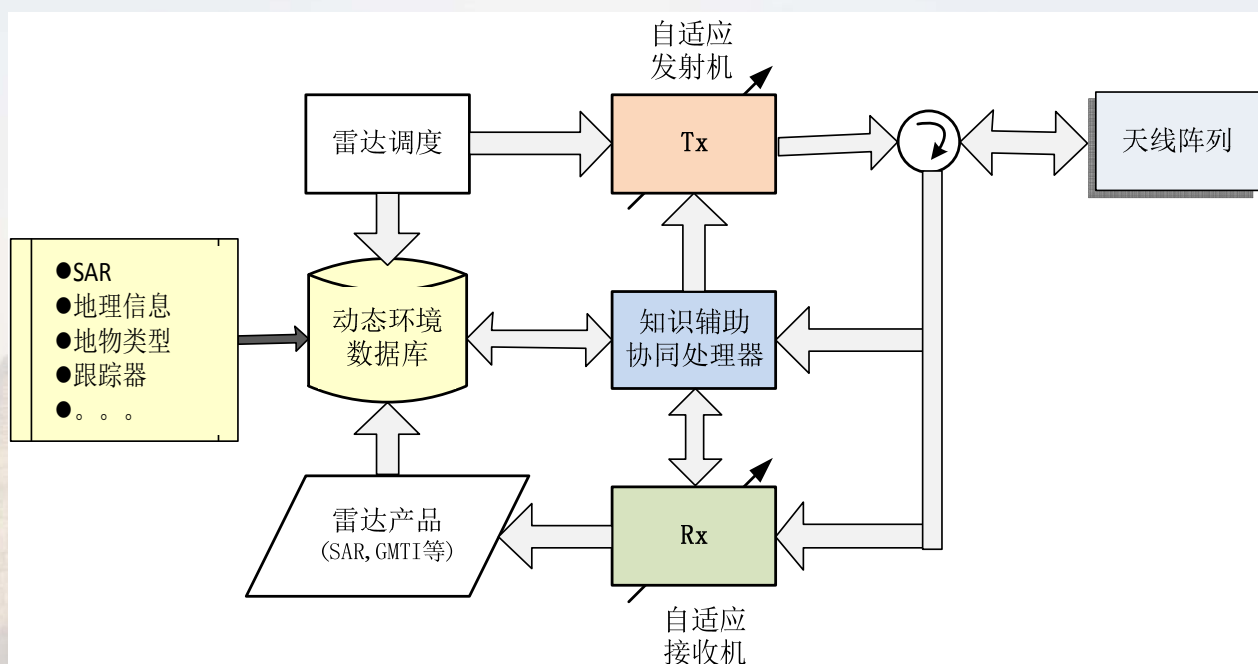


# LFM波形脉冲压缩



- LFM波形具有大时宽带宽积
- 通过脉冲压缩处理可同时实现距离-多普勒高分辨率
- LFM雷达通过Dechirp处理, 可使其中频带宽降至同观测目标大小成正比, 远远低于其波形的射频带宽

# 波形分集与认知雷达概念



# 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)