5 线性调频脉冲信号

一、现代雷达对波形的要求

- 测距精度和距离分辨力要求大带宽B，以保证大的 β_0、W_e
- 测速精度和速度分辨力要求大时宽T，以保证大的 δ 、T_e
- 为了提高作用距离，必须具有大时宽T

二、如何获得大时宽带宽信号

时/频域对信号进行相位或幅度调制（即增加均方根带/时宽），线性相位不行，只能移动时间或频率，只用平方、立方等相位才行。

三、大时宽带宽信号的特点

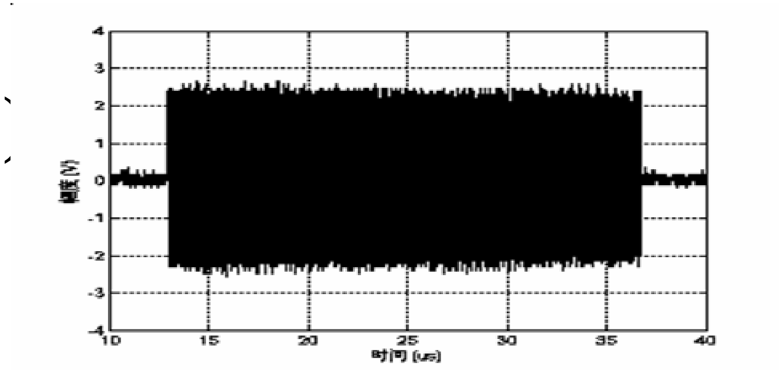
优点：解决矛盾，增强了抗干扰能力，增强了发现目标能力

缺点：最小作用距离增加，产生/处理复杂易失真，出现旁瓣，存在距离和速度测量模糊

5.1 线性调频脉冲信号（LFM）的产生

LFM信号实数表示为：

$$x(t) = rect[\frac{t}{T}]\cos(2\pi f_0 t + \pi k t^2)$$

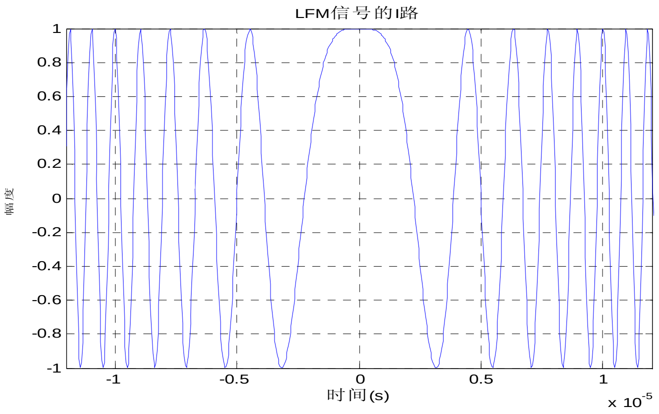


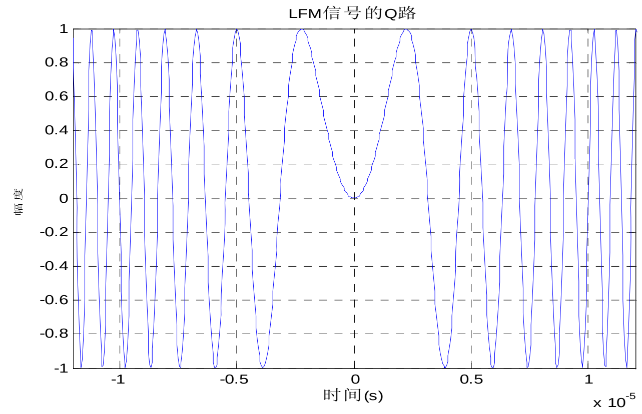
LFM信号复数表示为：

$$s(t) = u(t)e^{2\pi f_0 t} = |u(t)|e^{j\pi k t^2}e^{j2\pi f_0 t}$$

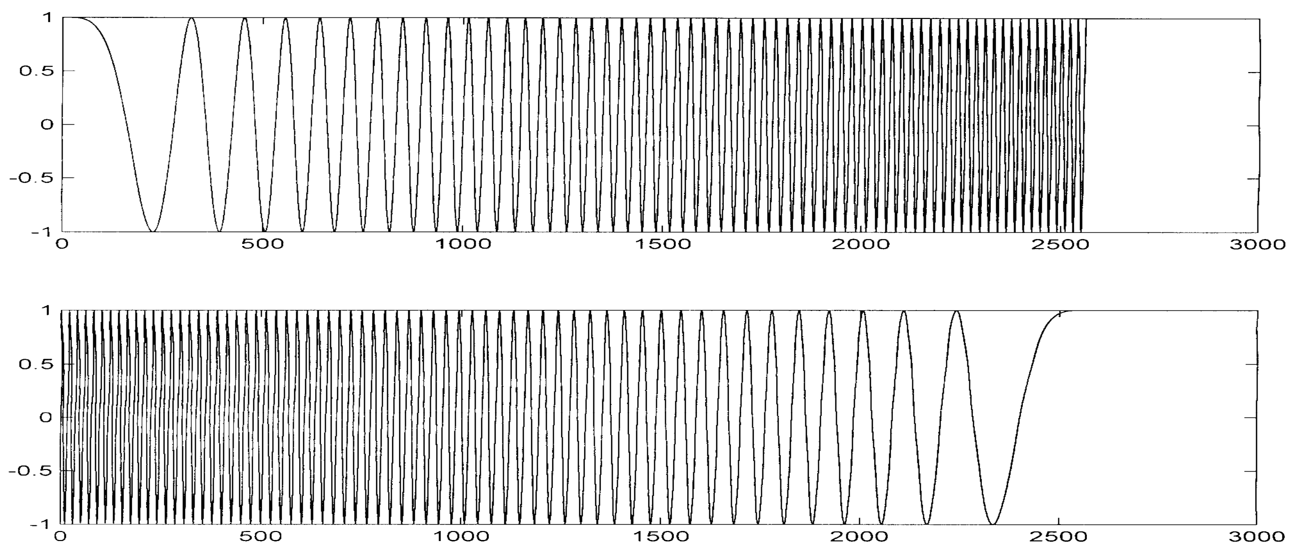
LFM信号复包络为：

$$u(t) = e^{j\pi k t^2}, u_I(t) = \cos(\pi k t^2), u_Q(t) = \sin(\pi k t^2)$$





瞬时频率：$$f_i = \frac{1}{2\pi}\frac{d}{dt}(2\pi f_0 t + \pi k t^2) = f_0 + kt$$



LFM产生方法:

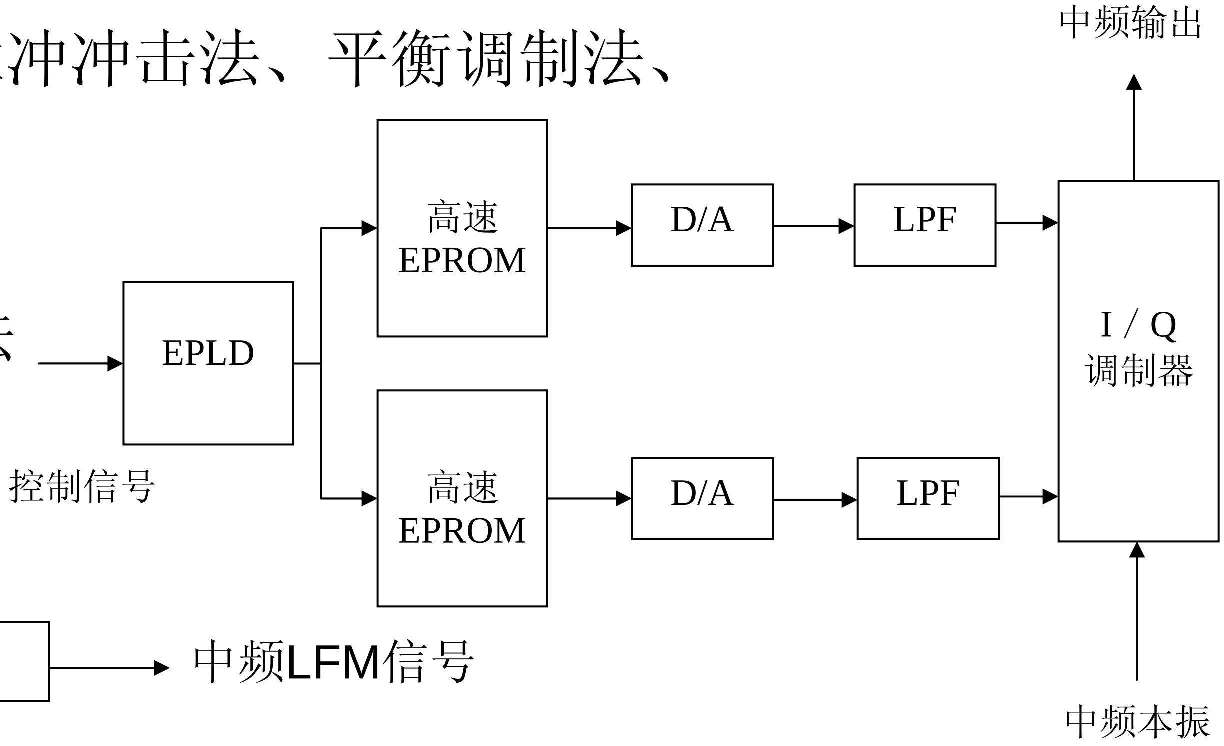
1、无源法：窄脉冲冲击法、平衡调制法、

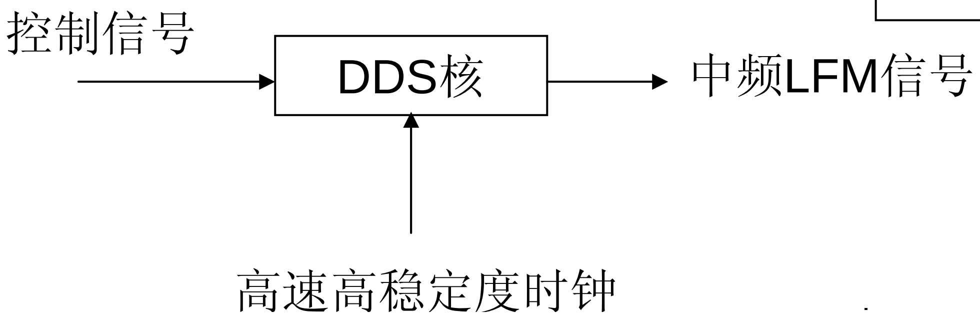
2、有源法：

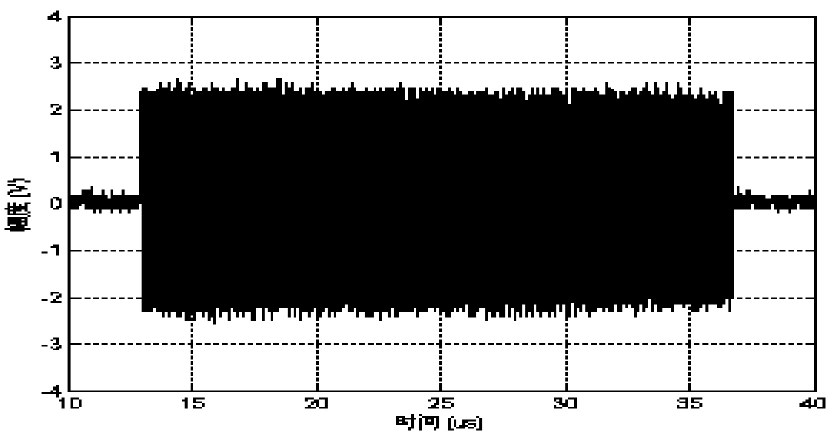
①波门选通法

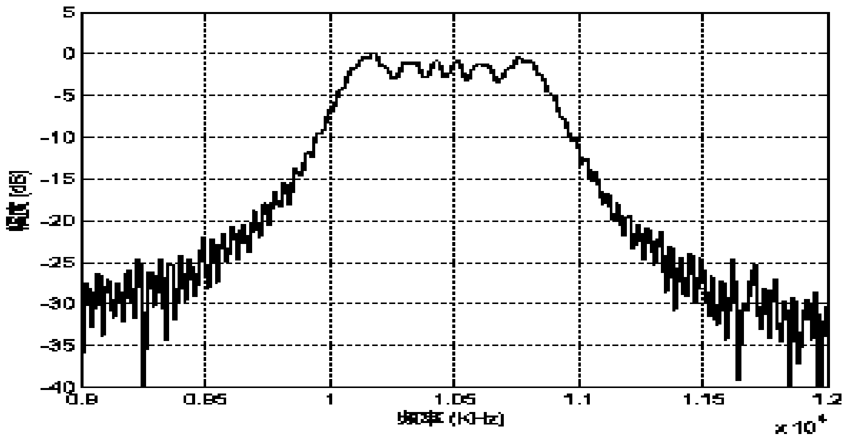
②I&Q正交调制法

③DDS法









5.2 线性调频脉冲信号的频谱

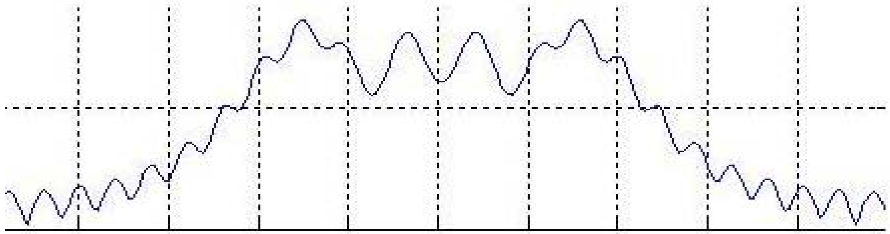
LFM信号复包络为：$u(t) = rect[\frac{t}{T}]e^{j\pi kt^2}$

频谱：
$$u(f) = \int_{-\infty}^{\infty} rect[\frac{t}{T}]e^{j\pi kt^2} e^{-j2\pi ft} dt$$

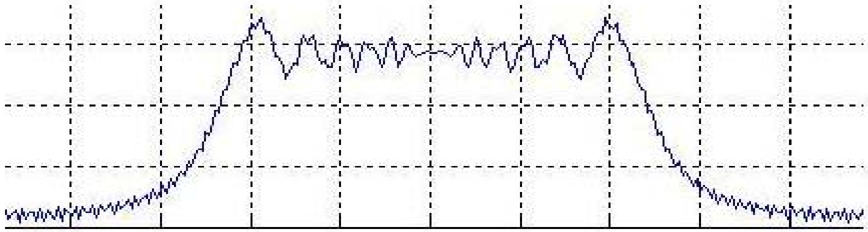
$$= \frac{1}{\sqrt{k}} rect[\frac{f}{B}]e^{-j\frac{\pi}{k}f^2 + j\frac{\pi}{4}}$$

$$\left|u(f)\right| = \frac{1}{\sqrt{k}} rect[\frac{f}{B}]$$

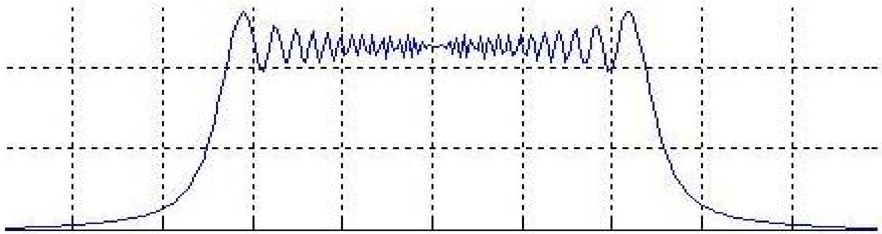
$$\theta_2 = \frac{\pi}{4}$$



BT=13



BT=52



BT=128

5.3 线性调频脉冲信号的波形参量

$$W_e = B \qquad (W_e{}' = \frac{3}{2}\frac{1}{T} = \frac{3}{2}B)$$

$$T_e = T \qquad (T_e' = T)$$

$$\beta_0^2 = \frac{(\pi B)^2}{3} \qquad (\beta_0^{2'} = \frac{2B}{T})$$

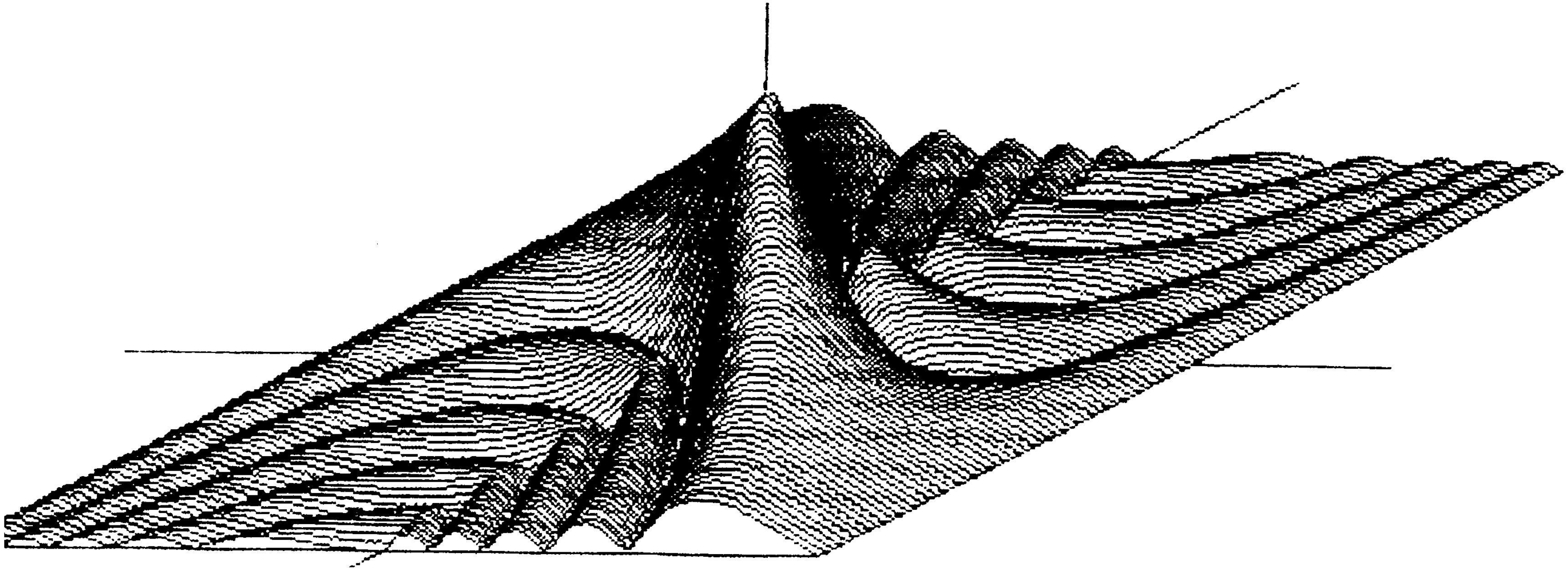
$$\delta^2 = \frac{(\pi T)^2}{3} \qquad (\delta^{2'} = \frac{(\pi T)^2}{3})$$

$$\alpha = \frac{\pi^2 BT}{3} \qquad (\alpha = 0)$$

5.4 线性调频脉冲信号的模糊函数

一、模糊函数

$$\left|\chi(\tau,\xi)\right| = \left|\frac{\sin[\pi(\xi - k\tau)(T-|\tau|)]}{\pi(\xi - k\tau)(T-|\tau|)}(T-|\tau|)\right| \qquad |\tau| < T$$

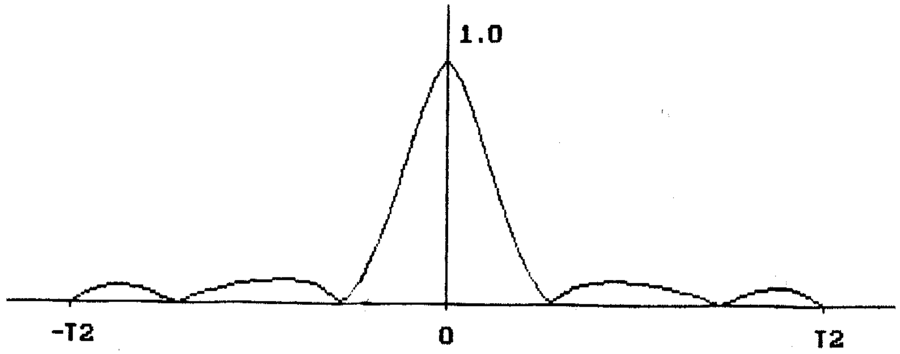


剪切角： $tg\theta = k = \dfrac{B}{T}$

二、切割

1、$\xi = 0$

$$\left|\chi(\tau,0)\right| = T\left|\frac{\sin[\pi B\tau(1-\left|\frac{\tau}{T}\right|)]}{\pi B\tau}\right|$$

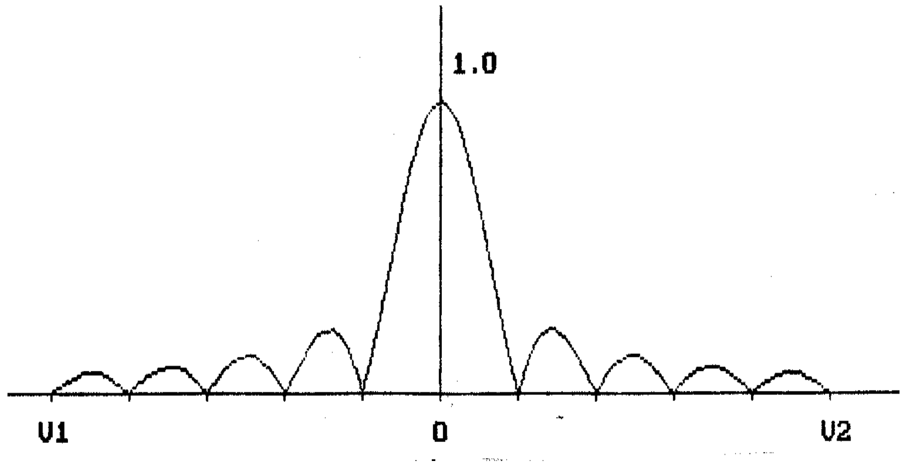


压缩比： $D = \dfrac{2T}{2\dfrac{1}{B}} = \dfrac{T}{\dfrac{1}{B}} = BT$

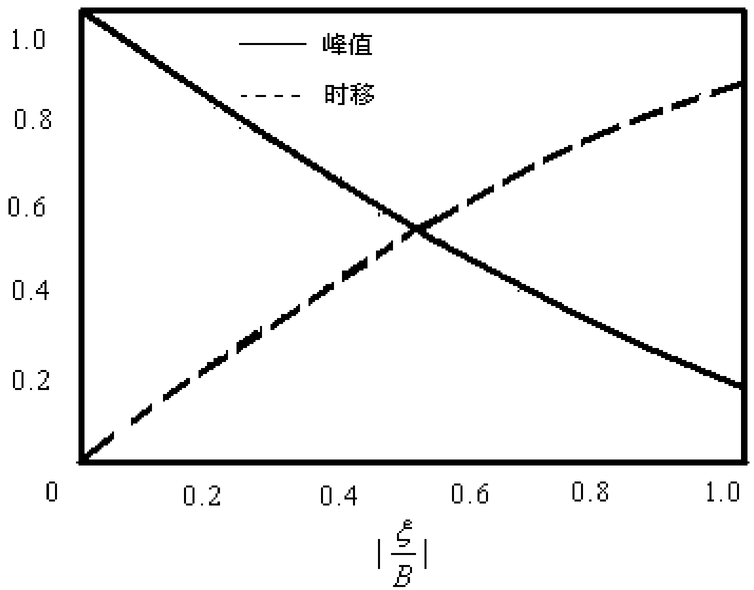
距离旁瓣：来因、影响

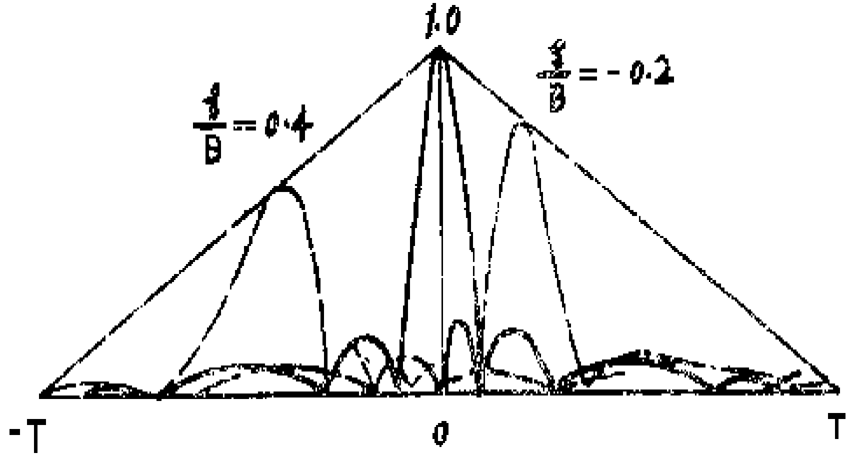
2、$\tau = 0$

$$\left|\chi(0,\xi)\right| = T\left|\frac{\sin(\pi\xi T)}{\pi\xi T}\right|$$



3、 $\xi = \xi_1 \neq 0$

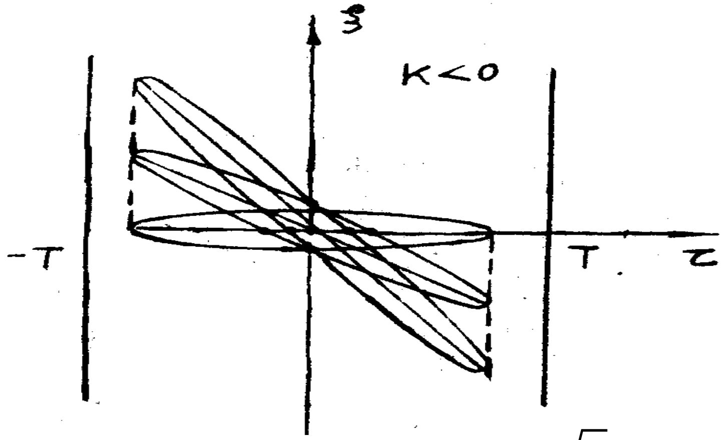


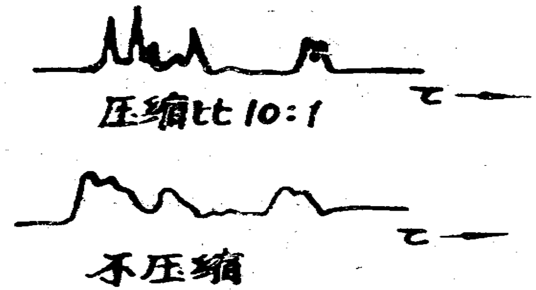


5.5 线性调频脉冲信号的性能

一、优点

1、距离分辨力提高We，速度分辨力相同Te





2、精度

$$\sigma_\tau = \frac{\sqrt{3}}{(\pi B)\sqrt{\frac{2E}{N_0}}} \qquad \sigma_\tau' = \frac{\sqrt{T}}{\sqrt{(2B)\frac{2E}{N_0}}}$$

$$\frac{\sigma_\tau'}{\sigma_\tau} = \frac{\pi}{\sqrt{6}}(BT)$$

$$\sigma_\xi = \sigma_\xi' = \frac{\sqrt{3}}{(\pi T)\sqrt{\frac{2E}{N_0}}}$$

3、B和T独立选取

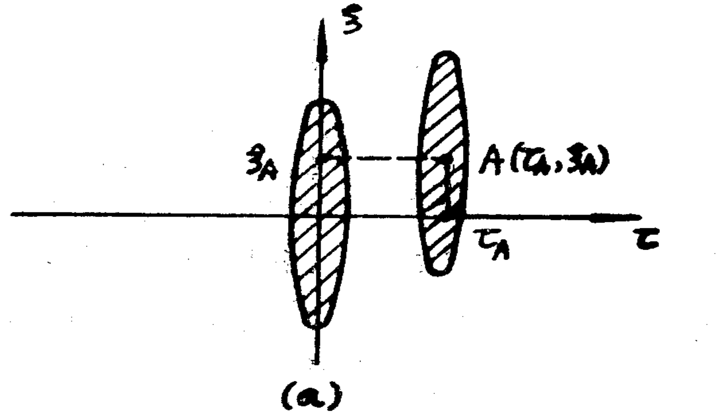
4、多普勒不敏感

二、缺点

1、组合值

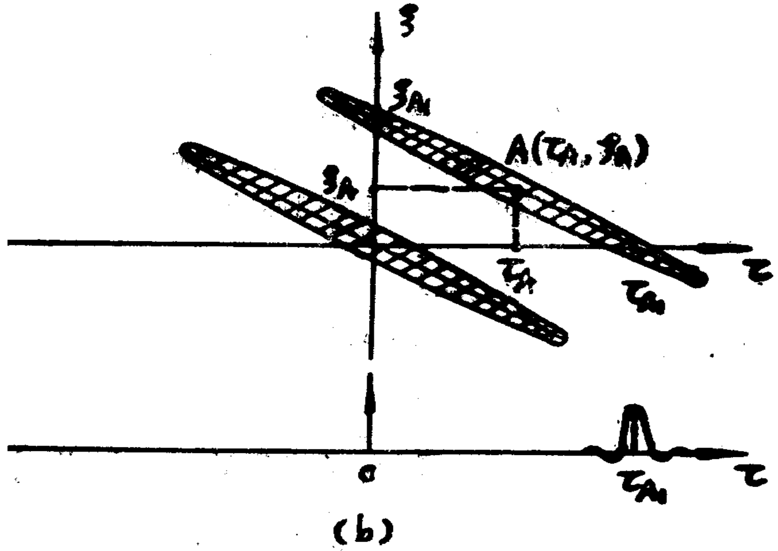
$$\tau_{A1} = \frac{\xi_A}{k} + \tau_A$$

$$\xi_{A1} = k\tau_A + \xi_A$$



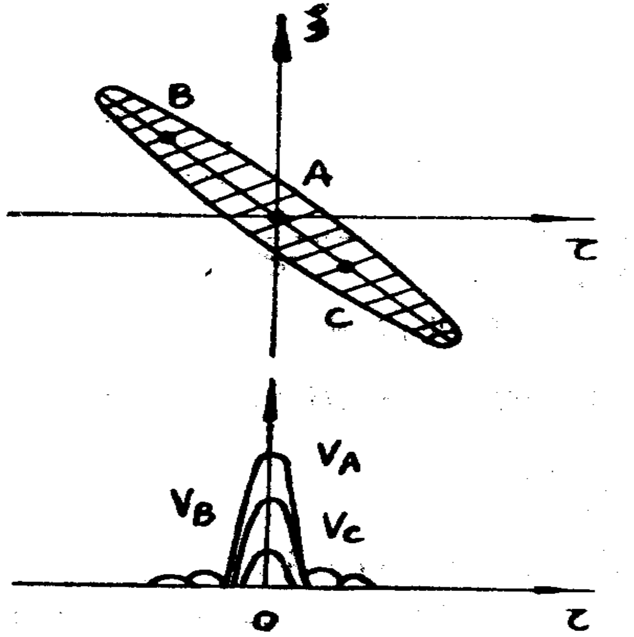
$$\sigma_\tau = \frac{1}{\beta_0\sqrt{\frac{2E}{N_0}[1-(\frac{\alpha}{\beta_0\delta})^2]}} \to \infty$$

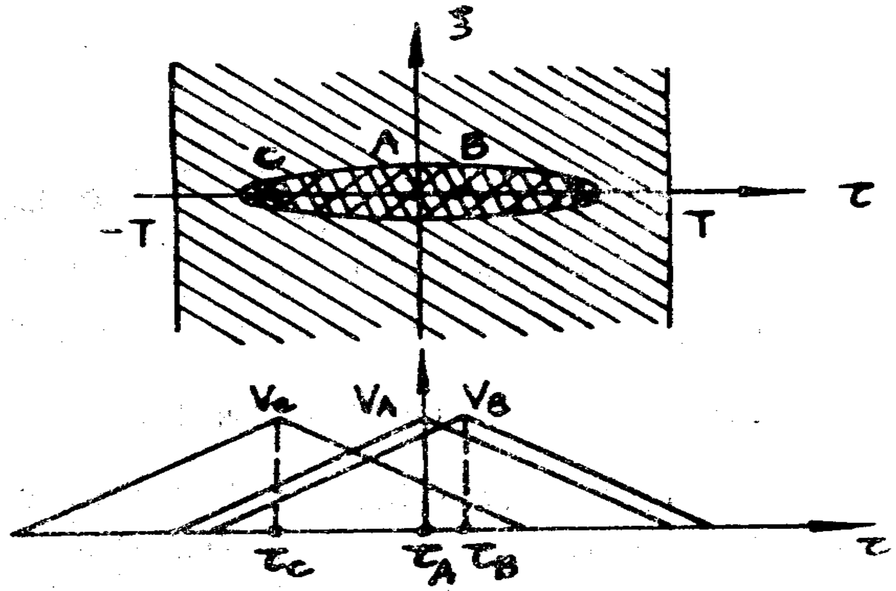
$$\sigma_\xi = \frac{1}{\delta\sqrt{\frac{2E}{N_0}[1-(\frac{\alpha}{\beta_0\delta})^2]}} \to \infty$$



解决方法：①正负斜率；②只测距/大斜率（K）；③V型调频。

2、斜刀刃上目标无法分辨



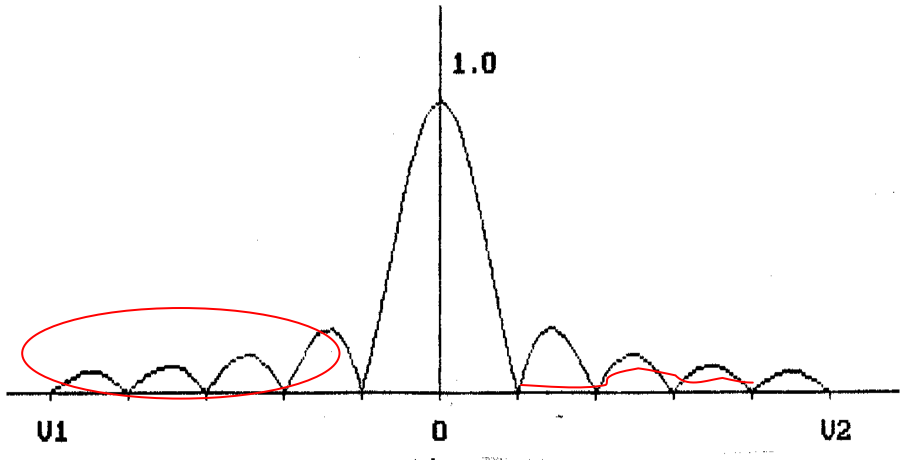


3、存在距离旁瓣

MSR=-13.2dB

旁瓣的坏处：

- 掩盖小目标（广义分辨）
- 减小了系统动态范围



5.6 线性调频脉冲信号的处理

一、近似匹配滤波器的实现

$BT > 30$ 时:　$$\mu(f) = \frac{1}{\sqrt{K}} rect\left(\frac{f}{B}\right) e^{-j\pi \frac{f^2}{K} + j\pi \frac{1}{4}}$$

匹配滤波器的频率特性:

$$H_{\approx}(f) = \mu^*(f) e^{-j2\pi f t_0} = \frac{1}{\sqrt{K}} rect\left(\frac{f}{B}\right) e^{j\pi \frac{f^2}{K} - j\frac{\pi}{4} - j2\pi f t_0}$$

$$\approx \frac{1}{\sqrt{K}} rect\left(\frac{f}{B}\right) e^{j\pi \frac{f^2}{K}} \qquad t_d = -\frac{1}{2\pi} \frac{d}{df}\left(\frac{\pi}{K} f^2\right) = -\frac{f}{K}$$

二、近似匹配滤波器的输出

输入信号的复包络为：

$$\mu(t) = rect\left(\frac{t}{T}\right)e^{j2\pi(\xi t+\frac{1}{2}Kt^2)}$$

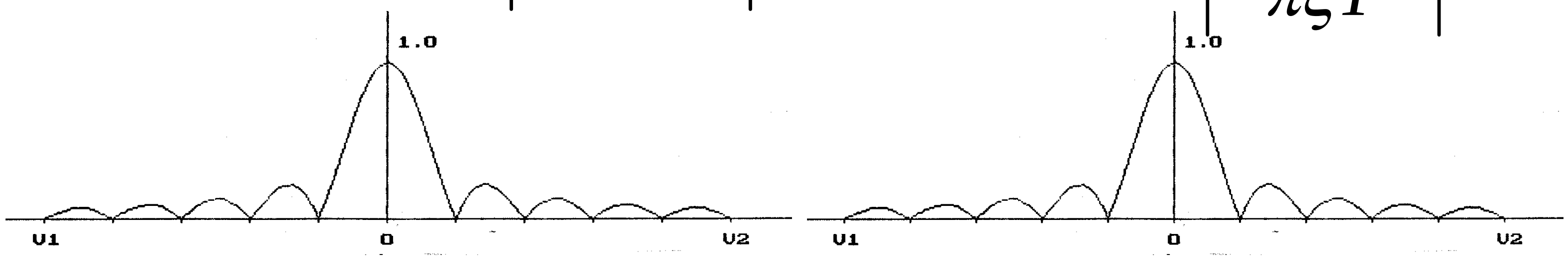
近似匹配滤波器输出为：

$$y(t,\xi) = \frac{\sin \pi(\xi + Kt)T}{\pi(\xi + Kt)}e^{j2\pi(-\frac{1}{2}Kt^2)+j\frac{\pi}{4}}$$

$$\left|y(\tau,\xi)\right| = \left|\frac{\sin\pi(\xi+K\tau)T}{\pi(\xi+K\tau)}\right| = T\left|\frac{\sin\pi(\xi+K\tau)T}{\pi(\xi+K\tau)T}\right|$$

$$\left|x(\tau,\xi)\right|^2 = \left|\frac{\sin\pi(\xi-K\tau)T}{\pi(\xi-K\tau)}\right|^2 = \left|y(-\tau,\xi)\right|^2$$

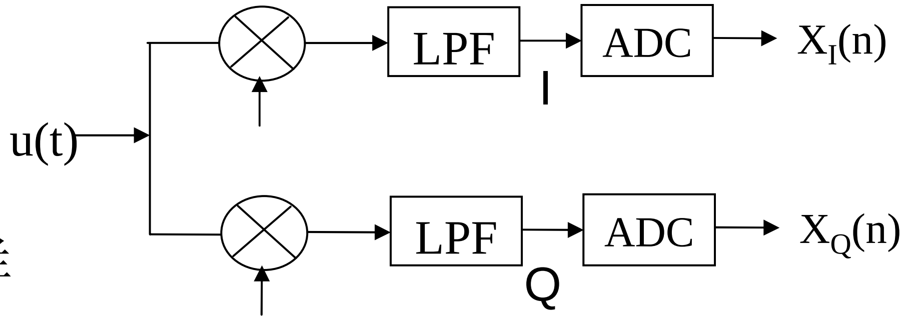
$$\left|y(\tau,0)\right| = T\left|\frac{\sin\pi B\tau}{\pi B\tau}\right| \qquad \left|y(0,\xi)\right| = T\left|\frac{\sin\pi\xi T}{\pi\xi T}\right|$$



三、匹配滤波器的实现

随机初相的影响，

采用IQ正交处理！



1、采样频率及中频采样

视频采样（低通）：

$$f_s \geq 2B \quad f_s = 1.25B, 1.5B$$

中频采样（带通）：

$f_s = 4f_0/(2n+1)$ ，n满足 $f_s \geq 2B$

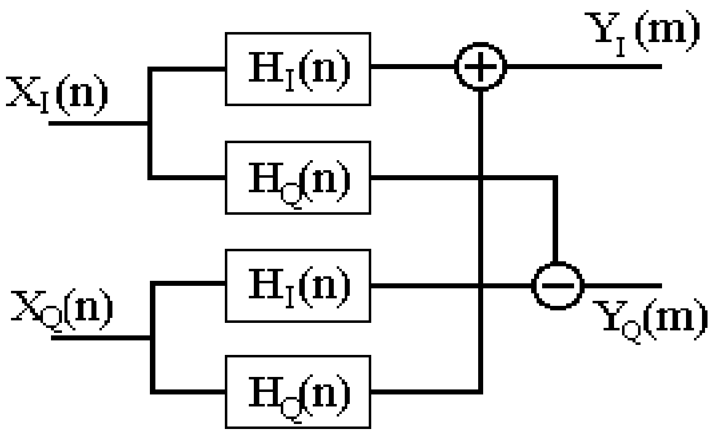
2、时域实现

$$X_I(n) = \cos\left(\pi k n^2 + \omega_d n + \theta\right)$$

$$X_Q(n) = \sin\left(\pi k n^2 + \omega_d n + \theta\right)$$

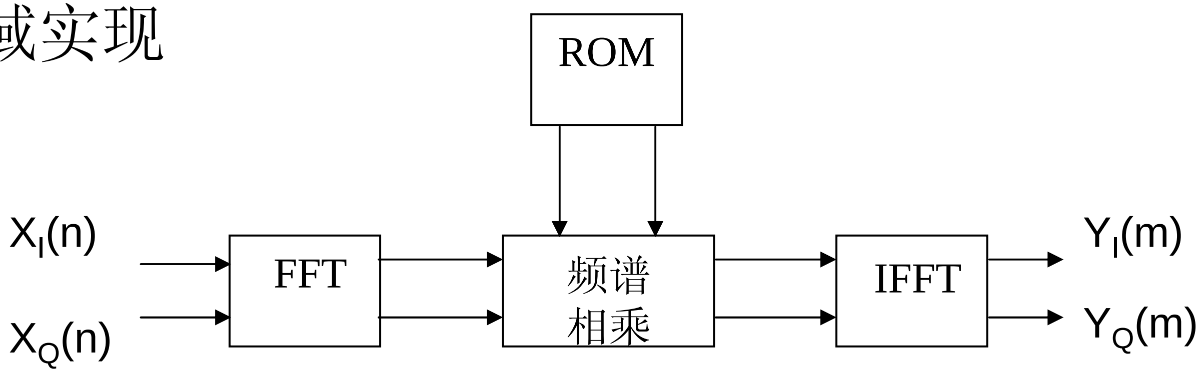
$$H_I(n) = \cos\left(\pi k n^2\right)$$

$$H_Q(n) = \sin\left(\pi k n^2\right)$$



$$D(m) = \sqrt{Y_I^2(m) + Y_Q^2(m)}$$

3、频域实现



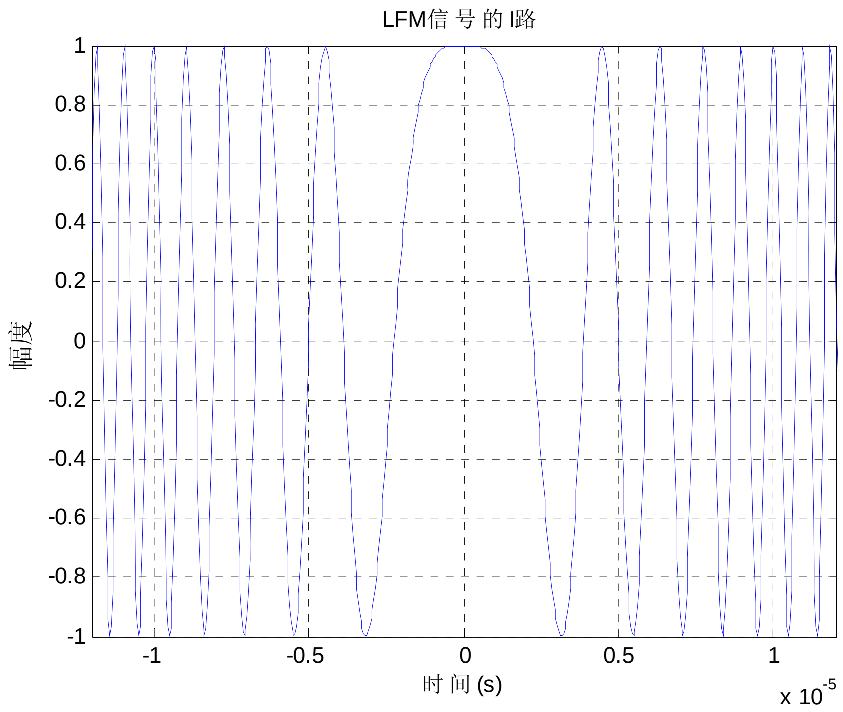
4、时频域实现对比

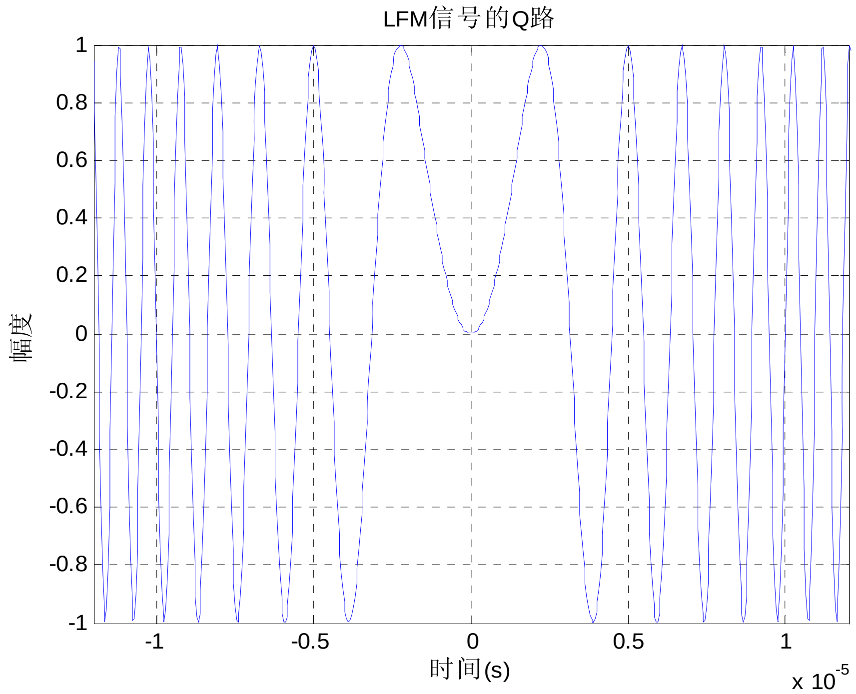
①时域（FIR滤波器）：

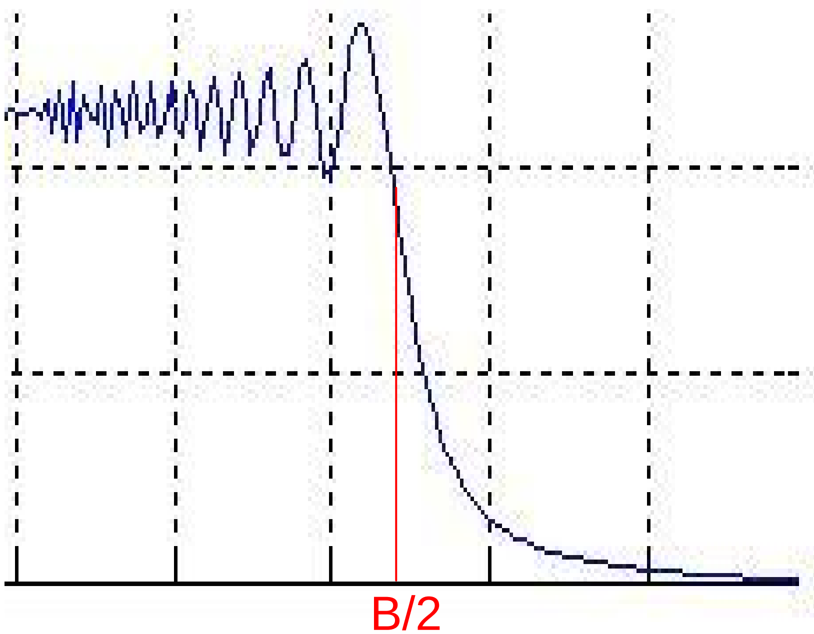
$f_s \geq 2B$，$n = 4 \times f_s T$ 阶，瞬时出；

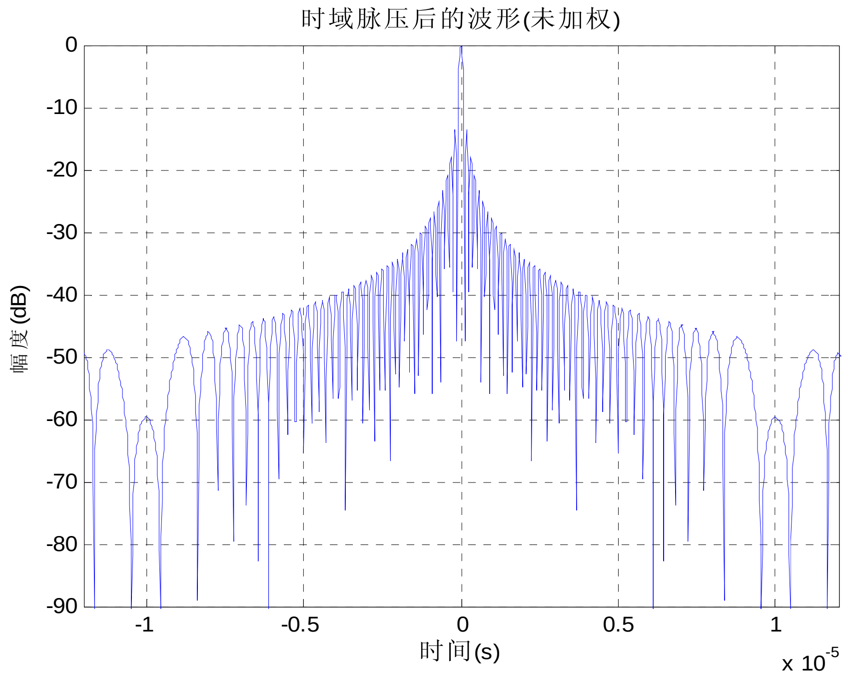
②频域（正反FFT）：

$f_s \geq 2B$，$N = T_r f_s$ 点，延时出。

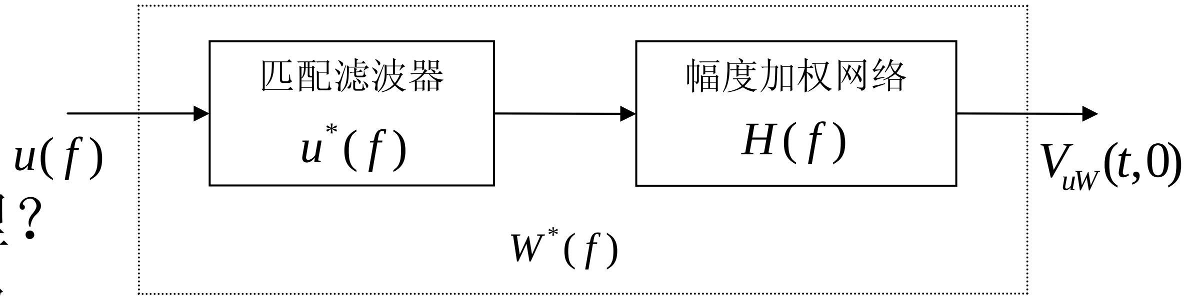

LFM信 号 的 I路
幅度
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1
-1
-0.5
0
0.5
1
时 间 (s)
x 10^-5


LFM信 号 的Q路
幅度
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1
-1
-0.5
0
0.5
1
时 间(s)
x 10^-5


B/2


时域脉压后的波形(未加权)
幅度(dB)
0
-10
-20
-30
-40
-50
-60
-70
-80
-90
-1
-0.5
0
0.5
1
时间(s)
x 10^-5

5.7 线性调频脉冲信号的加权处理



一、为何要加权处理？

二、频域上幅度加权

$$\left|V_{\mu w}(t,0)\right| = \left|\int_{-\infty}^{\infty} W^*(f)\cdot\mu(f)e^{j2\pi ft}df\right|$$

假设：

$$W^*(f) = \frac{\mu^*(f)}{\left|\mu(f)\right|^2}\cdot H(f)$$

$$\left|V_{\mu w}(t,0)\right| = \left|\int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} H(f)e^{j2\pi ft}df\right|$$

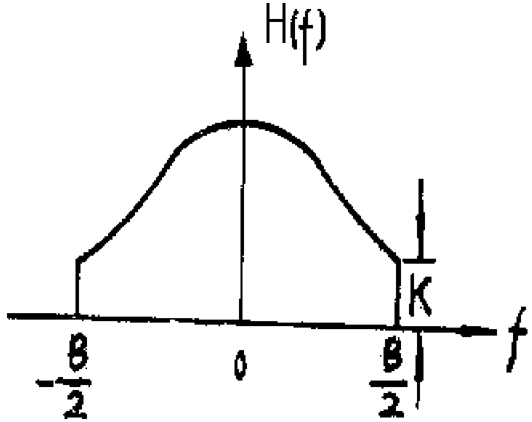
目的：①等效为矩形谱，②加权网络本身特性。

通用表达式：

$$H(f)=K+(1-K)\cos^n\left(\frac{\pi f}{B}\right)$$

简化：

$$H(f)=\frac{1+K}{2}+\frac{1-K}{4}\left[e^{j2\pi\frac{f}{B}}+e^{-j2\pi\frac{f}{B}}\right]$$



结果：

$$V_{\mu w}(t,0)=g_1(t)+g_2(t)+g_3(t)$$

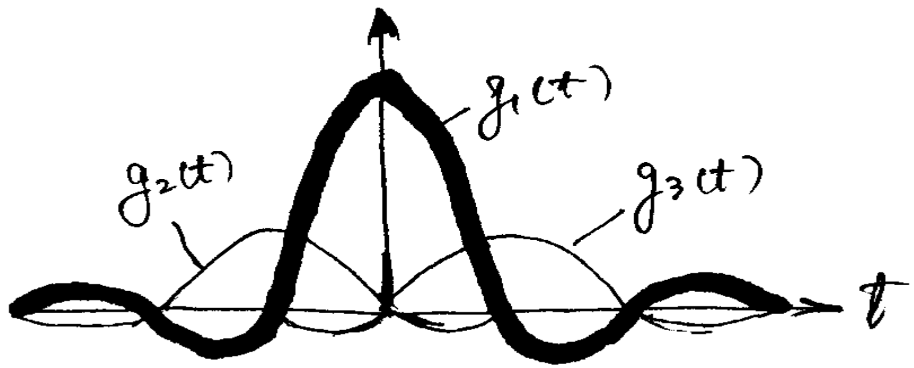
$$=\sqrt{\frac{T}{B}}\frac{(1+K)}{2}B\left\{\sin c(Bt)+\frac{1-K}{2(1+K)}\left[\sin c(Bt+1)+\sin c(Bt-1)\right]\right\}$$

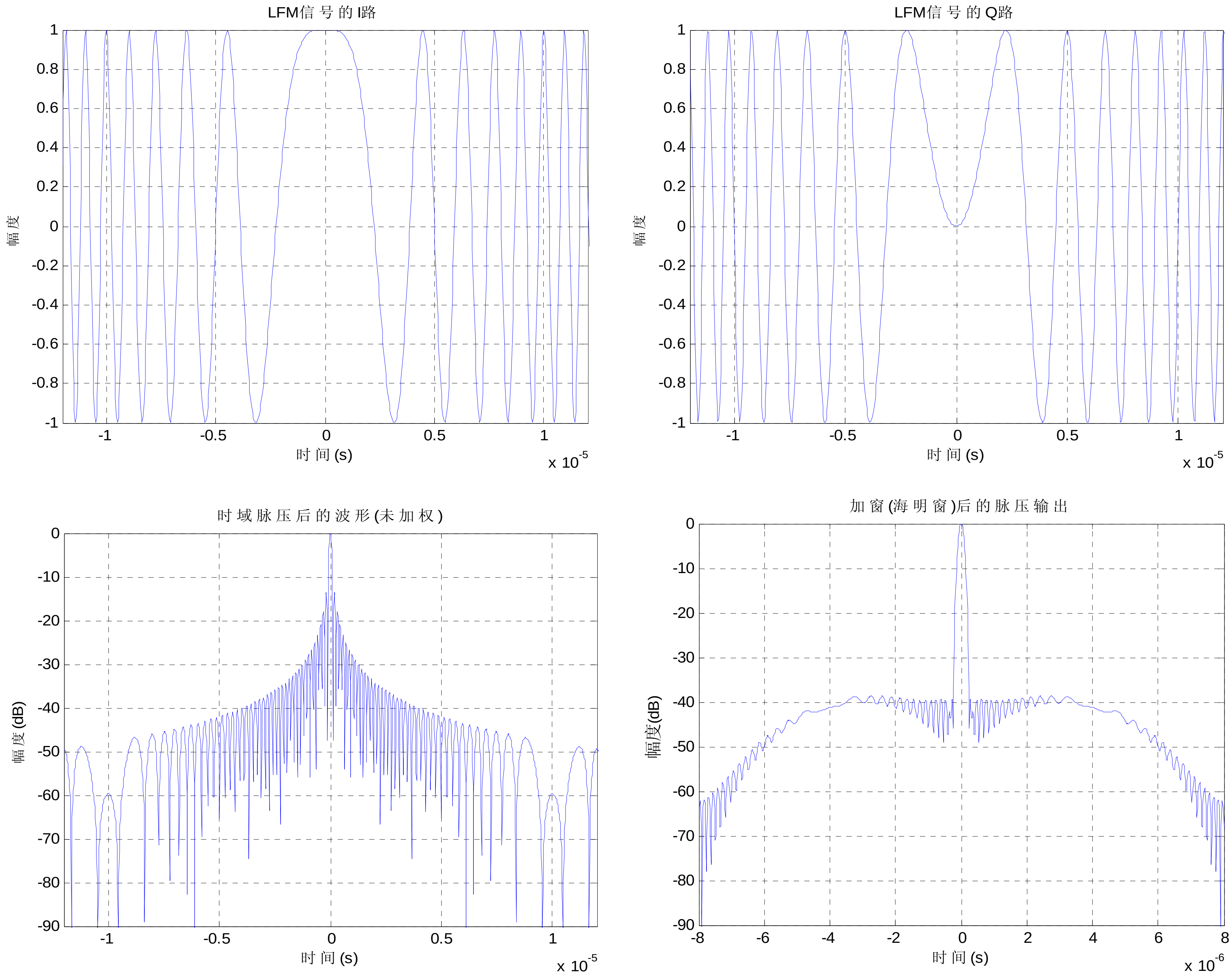
结论：①三个辛格函数组成，

②幅度K定，时移B定，

③K决定加权函数、性能

④B带宽。





LFM信 号 的 I路
LFM信 号 的 Q路
时 域 脉 压 后 的 波 形 (未 加 权)
加 窗 (海 明 窗)后 的 脉 压 输 出
幅 度
幅度(dB)
时 间 (s)
x 10^-5
x 10^-6

三、加权性能分析

1、信噪比损失

不采用加权网络信噪比为： $\left[\frac{S}{N}\right]_M = \frac{2BT}{N_0 B} = \frac{2T}{N_0}$

采用加权网络信噪比为：

$$\left[\frac{S}{N}\right]_{NM} = \frac{\left[\sqrt{\frac{T}{B}}\int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} H(f)\,df\right]^2}{N_0 \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} H^2(f)\,df}$$

信噪功率比损失为：

(海明：-1.34dB)

$$L_{S/N} = 10\lg\frac{\left[\frac{S}{N}\right]_{NM}}{\left[\frac{S}{N}\right]_M} = 10\lg\left\{\frac{\left[\int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} H(f)df\right]^2}{B\int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} H^2(f)df}\right\}(dB)$$

$$L_{S/N} = 10\lg\left[\frac{\left(\frac{1+K}{2}B\right)^2}{B\cdot\frac{B}{8}(3K^2+2K+3)}\right] = 10\lg\left[\frac{2(K^2+2K+1)}{3K^2+2K+3}\right]$$

2、最大主旁瓣比

$$V_{\mu w}(0,0)=\sqrt{\frac{T}{B}}(\frac{1+K}{2})B$$

$$20\lg\frac{V_{\mu w}(t_1,0)}{V_{\mu w}(0,0)}=20\lg\left[V_{\mu w}(t_1,0)\Big/\sqrt{\frac{T}{B}}(\frac{1+K}{2})B\right]_{db}$$

海明：-42.67dB（t_1=4.5/B）

3、-3dB的主瓣加宽系数

$$\frac{V_{\mu}(t,0)}{V_{\mu}(0,0)}=\sin c(Bt)\quad V_{\mu}(0.443/B,0)\big/V_{\mu}(0,0)=0.707$$

$$\frac{V_{\mu w}(t,0)}{V_{\mu w}(0,0)}=\sin(BT)+\frac{1-K}{2(1+K)}\left[\sin c(Bt+1)+\sin c(Bt-1)\right]$$

$$\frac{V_{\mu w}(t_2, 0)}{V_{\mu w}(0, 0)} = 0.707$$

$$\frac{t_2}{0.443 / B}$$

海明： $t_2 = 0.6512 / B$

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{0.6512}{0.443} = 1.47$$

作业:

1、用模糊图的切割来理解LFM信号是多普勒不敏感信号。

2、如果目标A与B的距离相同，但速度不同，那么这两个目标能否分辨？

3、处在斜刀刃上的目标速度能否分辨？为什么？