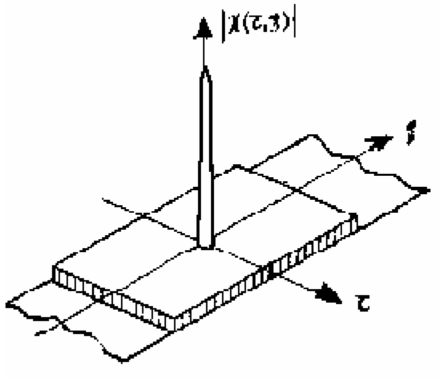
6 相位编码脉冲信号

6.1 二相编码信号
6.2 二元伪随机序列
6.3 PN截断码
6.4 巴克（Barker）序列
6.5 增加巴克码长度的方法
6.6 二相编码信号的处理
6.7 相位编码信号多普勒敏感问题
6.8 多相编码信号简介

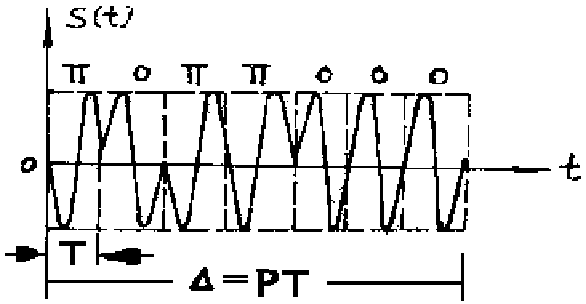
6.1 二相编码信号



一、理想模糊图（图钉型）

二、二相编码信号基本概念

$$s(t) = a(t)e^{j\varphi(t)}e^{j2\pi f_0 t} = \mu(t)e^{j2\pi f_0 t}$$



π	0	π	π	0	0	0
−	+	−	−	+	+	+

$$c_K = e^{j\varphi(t)} = \begin{cases} 1 & \varphi(t) = 0 \\ -1 & \varphi(t) = \pi \end{cases}$$

$$\{c_K\} = \{-1,+1,-1,-1,+1,+1,+1\}$$

$$\{c_K\} = \{- + - - + + +\}$$

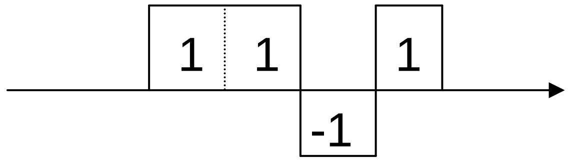
$$d_K = \begin{cases} 0 & \varphi(\mathrm{t}) = 0 \\ 1 & \varphi(\mathrm{t}) = \pi \end{cases}$$

$$\{d_K\} = \{1,0,1,1,0,0,0\}$$

{ck}之积按乘法运算；

{dk}之积按模2加法运算。

三、二相编码信号的频谱



$$\mu(t)=\begin{cases}\dfrac{1}{\sqrt{P}}\sum\limits_{K=0}^{P-1}c_K\mu_1(t-KT) & 0<t<\varDelta\\ 0 & \text{其它}\end{cases}$$

$$\mu_1(t)=\begin{cases}1/\sqrt{T} & 0<t<T\\ 0 & \text{其它}\end{cases}$$

$$\mu(t)=\mu_1(t)*\frac{1}{\sqrt{P}}\sum_{K=0}^{P-1}c_K\delta(t-KT)$$

$$=\mu_1(t)*\mu_2(t)$$

$$\mu_2(t)=\frac{1}{\sqrt{P}}=\sum_{K=0}^{P-1}c_K\delta(t-KT)$$

$$\mu(f)=\frac{\sqrt{\mathrm{T}}}{\sqrt{\mathrm{P}}}\sin c(fT)e^{-j\pi fT}$$

$$\cdot\left[P+2\sum_{K=1}^{P-1}\sum_{n=K}^{P-1}c_nc_{n-K}\cos(2\pi fKT)^{1/2}\right]$$

结论:

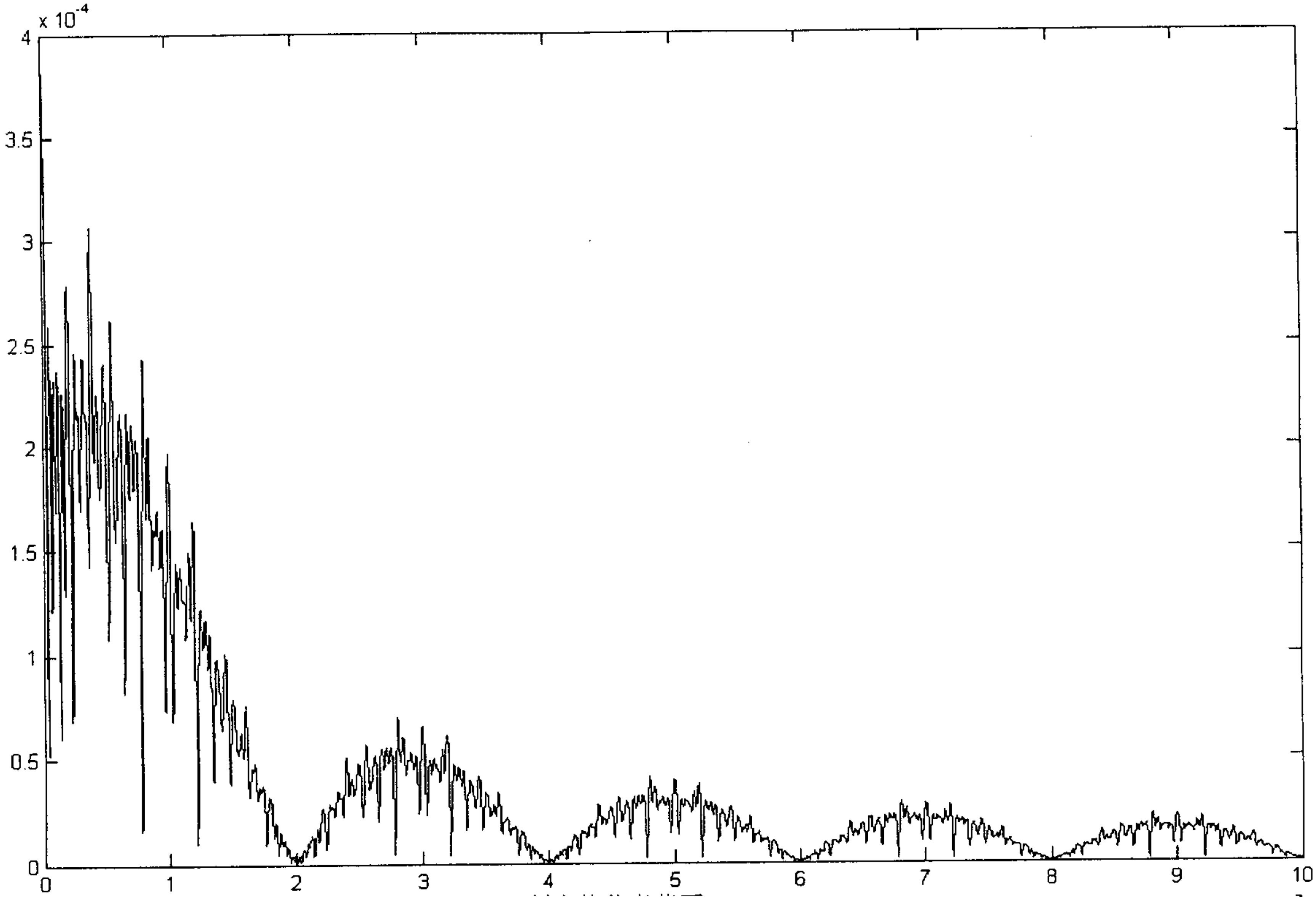
①频谱形状

②频谱宽度

③时宽带宽积

④大时宽带宽积信号

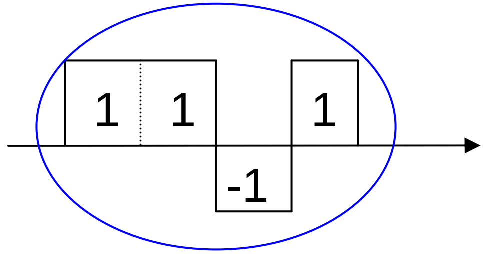
$$B=\frac{1}{T}=\frac{P}{P\cdot T}=\frac{P}{\Delta}$$



1/T

四、二相编码信号的模糊函数

$$\mu(t)=\begin{cases}\dfrac{1}{\sqrt{P}}\sum\limits_{K=0}^{P-1}c_K\mu_1(t-KT) & 0<t<\varDelta \\ 0 & 其它\end{cases}$$



$$|\chi(\tau,\xi)|^2=\left|\frac{1}{P}\sum_{m=1}^{p-1}e^{j2\pi\xi mT}\chi_1(\tau+mT,\xi)\sum_{i=0}^{P-1-m}c_ic_{i+m}e^{j2\pi\xi iT}\right.$$

$$\left.+\frac{1}{P}\sum_{m=0}^{p-1}\chi_1(\tau-mT,\xi)\sum_{i=0}^{P-1-m}c_ic_{i+m}e^{j2\pi\xi iT}\right|^2$$

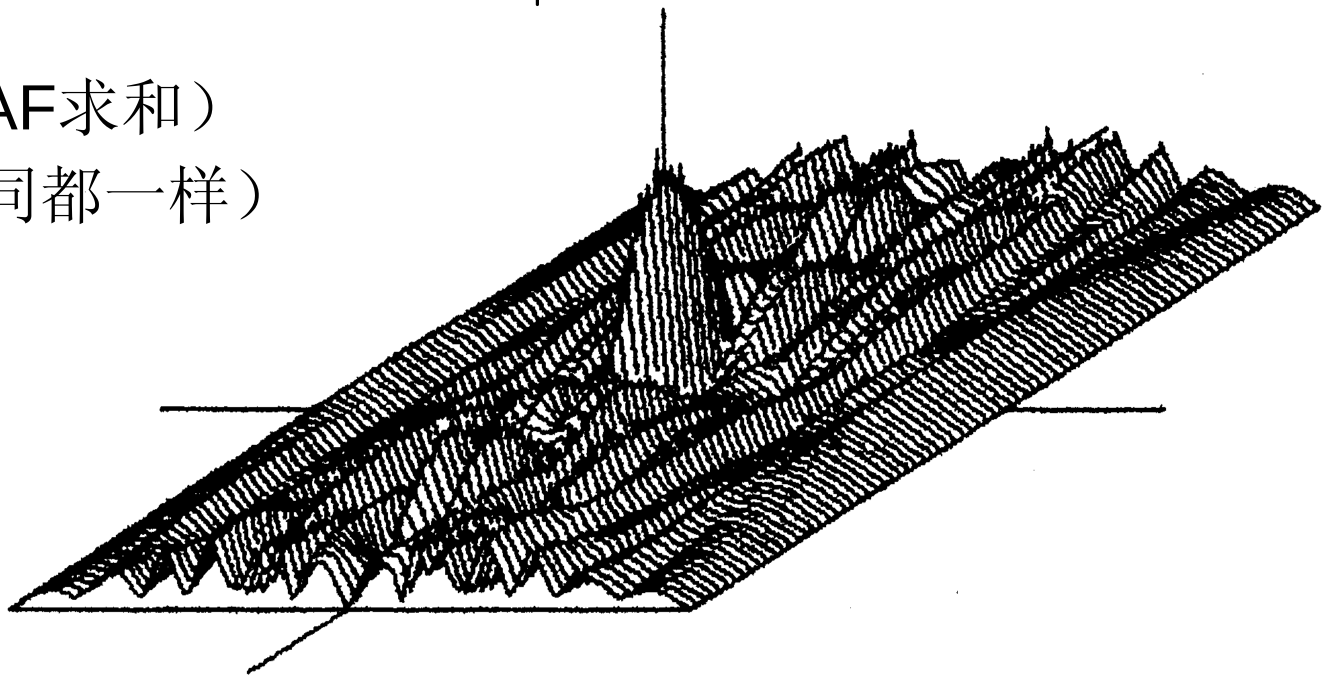
特点：（子脉冲AF求和）

①主峰（码长相同都一样）

②旁瓣

③敏感性

对称性



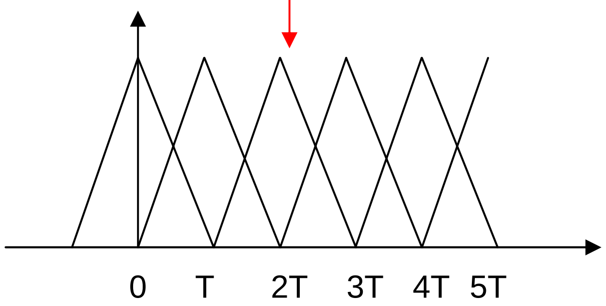
五、二相编码信号的自相关函数（非周期）

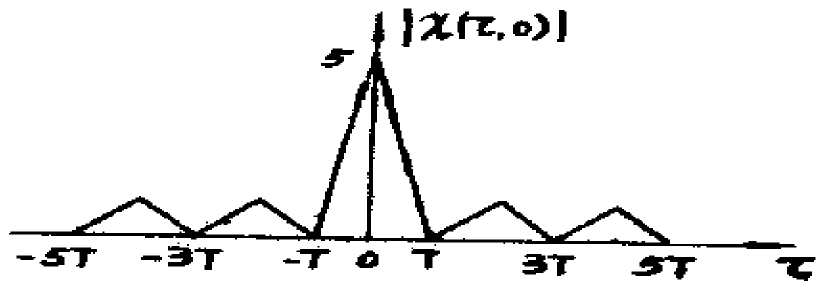
$$\chi(\tau,0)=\frac{1}{P}\sum_{i=0}^{P-1-m}c_ic_{i+m}\cdot\sum_{m=-(P-1)}^{P-1}\chi_1(\tau-mT,0)$$

$$=\frac{1}{P}\sum_{m=-(P-1)}^{P-1}\chi_1(\tau-mT,0)\cdot\chi_2(m,0)$$

$$\chi_2(m,0)=\sum_{i=0}^{P-1-m}c_ic_{i+m}$$

$$\left.\begin{aligned}
\chi_2(0,0)&=\sum_{i=0}^{4}c_ic_i=c_0c_0+c_1c_1+c_2c_2+c_3c_3+c_4c_4=5\\
\chi_2(1,0)&=\sum_{i=0}^{3}c_ic_{i+1}=c_0c_1+c_1c_2+c_2c_3+c_3c_4=0\\
\chi_2(2,0)&=\sum_{i=0}^{2}c_ic_{i+2}=c_0c_2+c_1c_3+c_2c_4=1\\
\chi_2(3,0)&=\sum_{i=0}^{1}c_ic_{i+3}=c_0c_3+c_1c_4=0\\
\chi_2(4,0)&=\sum_{i=0}^{0}c_ic_{i+4}=c_0c_0=1
\end{aligned}\right\}$$





结论：

①{Ck}决定自相关函数

②主峰高度，旁瓣电平

③非周期性

6.2　二元伪随机序列

一、二元随机序列和二元伪随机序列

平衡性　、蝉联性、相关函数、周期、频谱

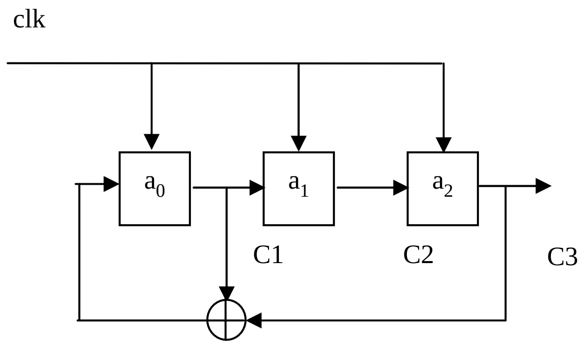
二、最大长度序列（M序列）

1、产生

M序列的周期为：　$P = 2^n - 1$

反馈联接方式共有：　$\dfrac{\varphi\left(2^n - 1\right)}{n}$

反馈方式：见资料



2、模糊函数

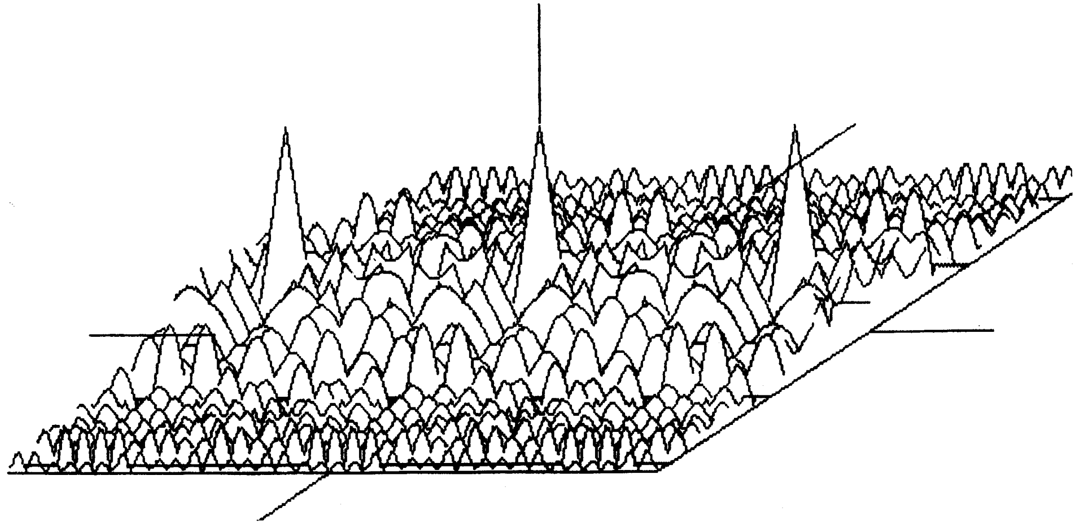
$$\chi(\tau,\xi) = \frac{1}{p}\sum_{i=-(p-1)}^{p-1} e^{j\pi\xi(p-i-1)pT} \sin[\pi\xi(p-|i|)pT] \Big/ \sin(\pi\xi pT) \cdot \chi_1(\pi - ipT\xi)$$

特点：①图钉型；②多峰；③旁瓣电平变化规律。

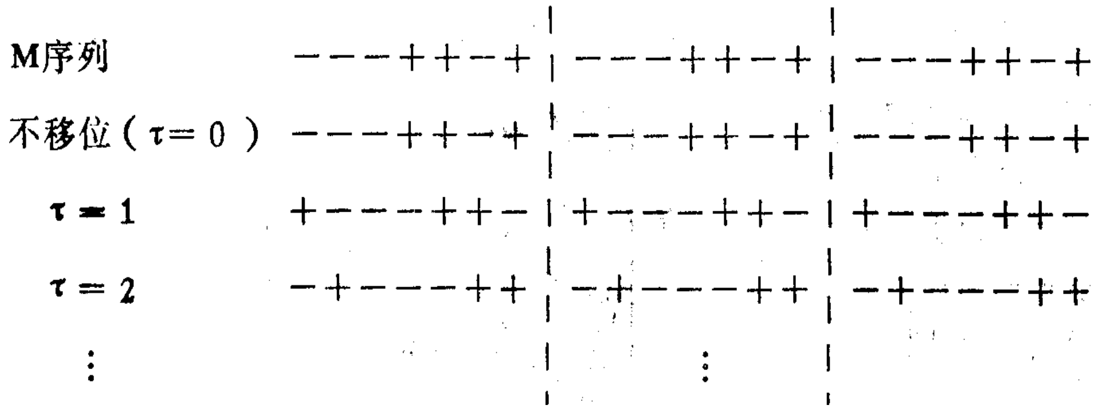
3、自相关函数（周期性）

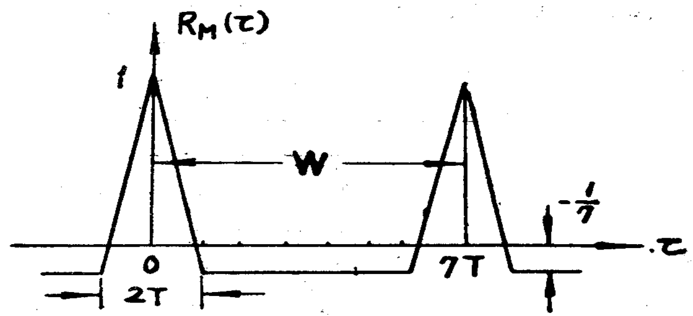
方法一：

$$\chi(\tau,0)=\begin{cases}1-\dfrac{2^n}{2^n-1}\left|\dfrac{\tau}{\mathrm{T}}\right| & |\tau|<T \\ -\dfrac{1}{2^n-1} & \text{其它}\end{cases}$$



方法二：





结论：①双值电平，*MSR=20logP*；②多峰；

③P→∞，$\chi(\tau,0)\approx\delta(t)$ ；④周期性自相关函数。

周期的选择：① $pT/\tau_{\max}>2$ ；② $pTf_{d\max}<\dfrac{1}{2}$

4、M序列的功率谱

$$\phi(f)=\frac{p+1}{p^2}\left|\frac{\sin\pi fT}{\pi fT}\right|^2\sum_{n=-\infty,n\neq0}^{\infty}\delta(f-\frac{n}{pT})+\frac{1}{p^2}\delta(f)$$

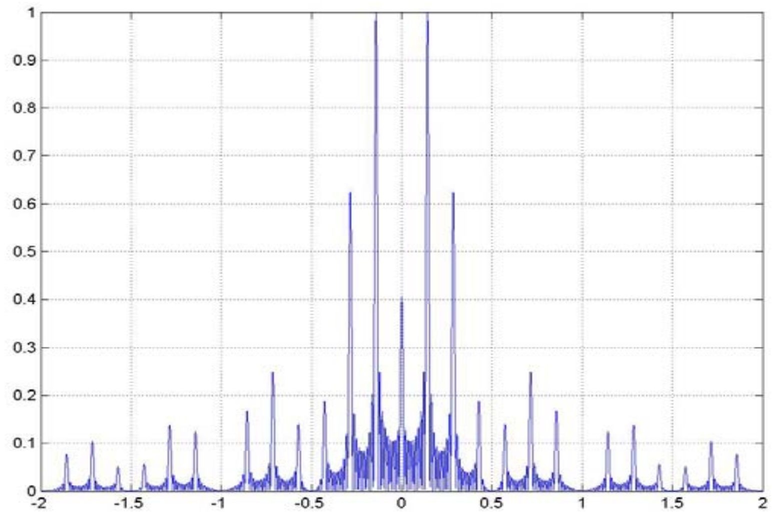
特点：

①线性谱，相邻谱线的间隔为 $\frac{1}{pT}$；

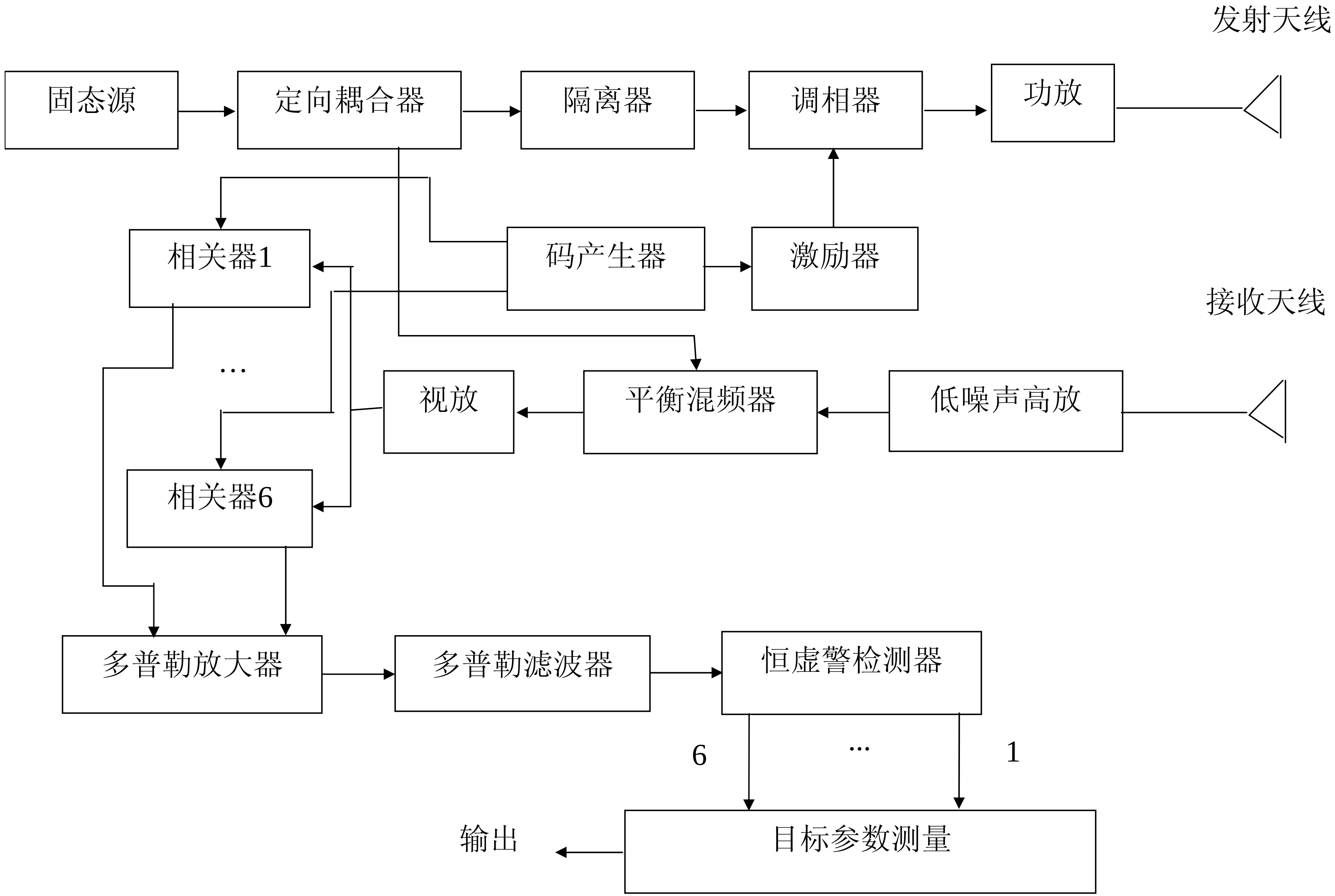
②零频率分量的强度为 $\frac{1}{p^2}$；

③包络由码元宽度 T 决定；

④各谱线的强度与序列的长度和编码码型有关。



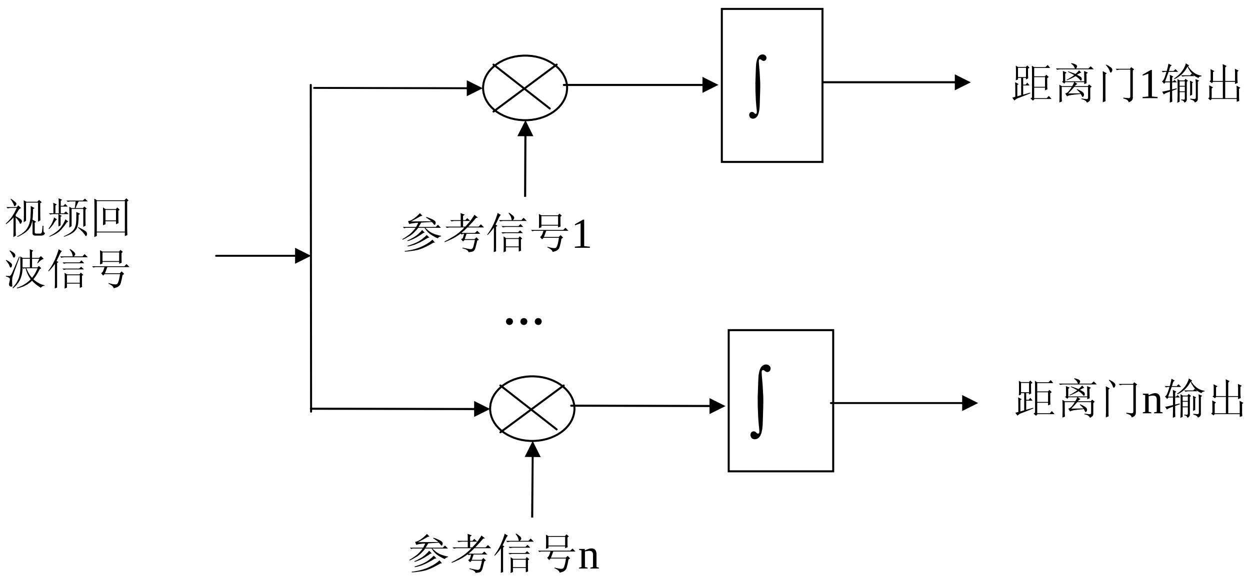
5、 M序列的应用


发射天线
固态源
定向耦合器
隔离器
调相器
功放
相关器1
码产生器
激励器
接收天线
…
视放
平衡混频器
低噪声高放
相关器6
多普勒放大器
多普勒滤波器
恒虚警检测器
6
…
1
输出
目标参数测量

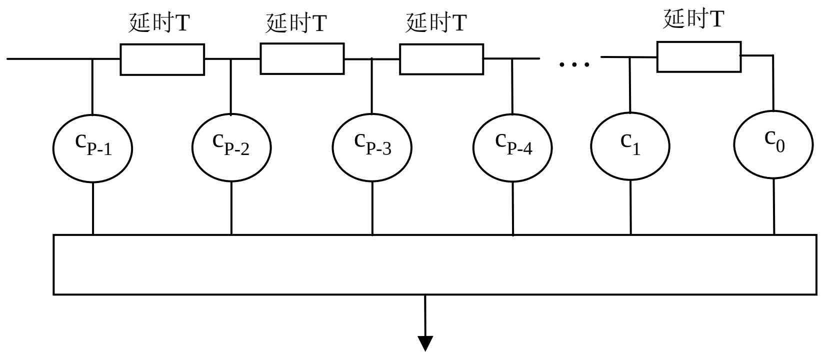
6、 M序列的信号处理

采用多路相关器（可以复用）和多普勒滤波器组。

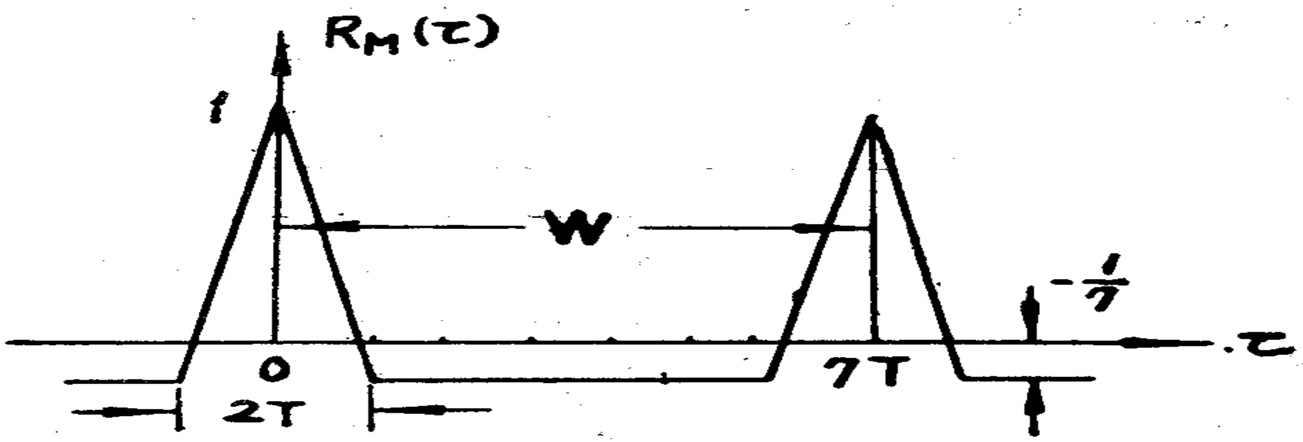
相关器：



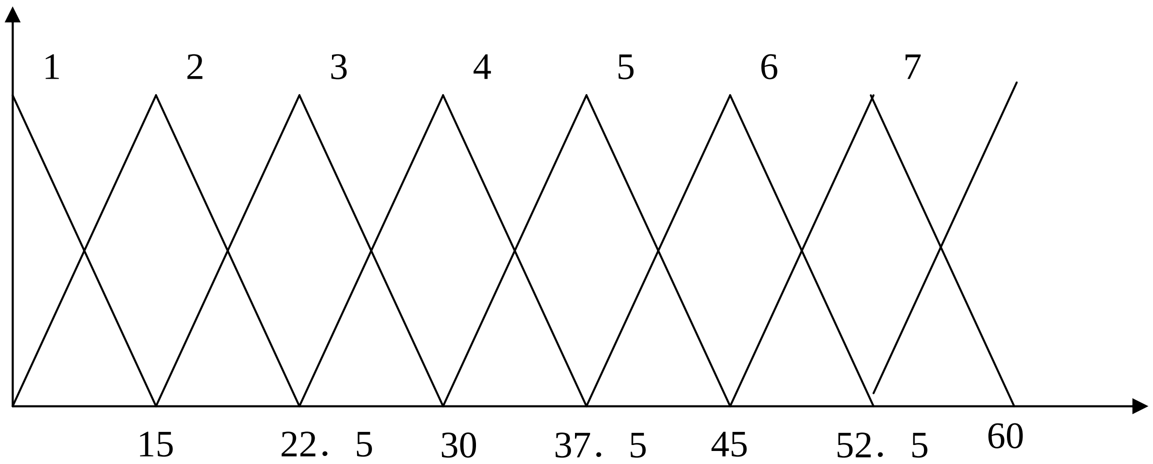
匹配滤波器：



多普勒滤波器组：FFT（MTD）



RM(τ)
1
W
0
2T
7T
-1/7
τ



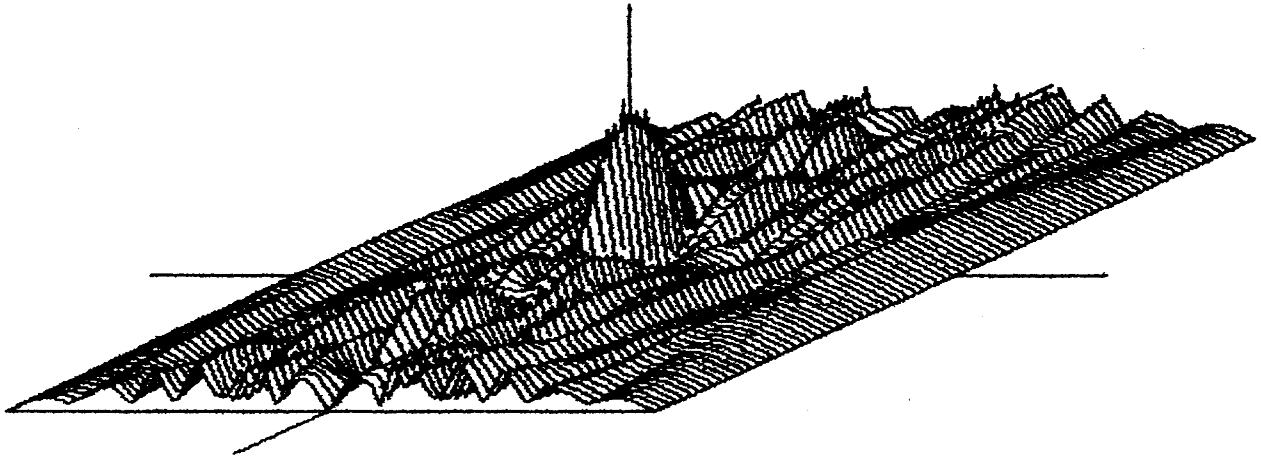
1
2
3
4
5
6
7
15
22. 5
30
37. 5
45
52. 5
60

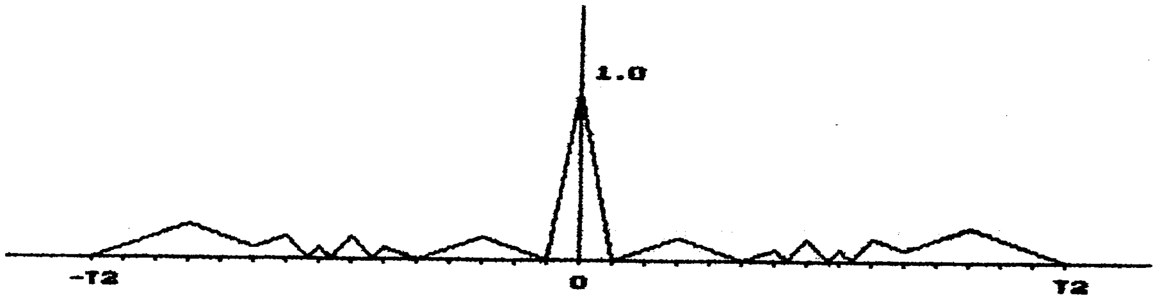
6.3 PN截断码

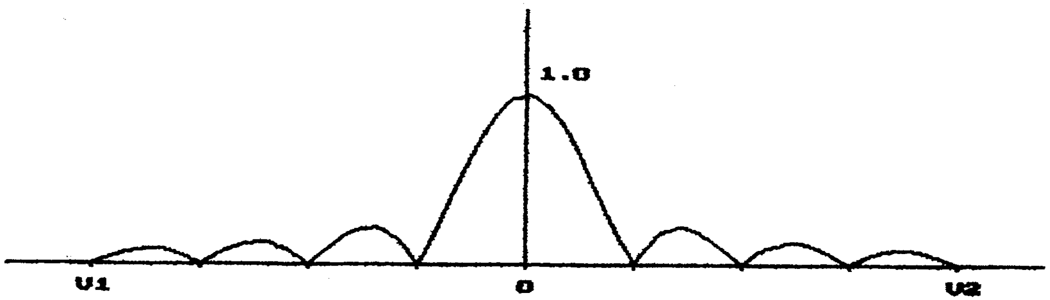
一、定义

PN截断码就是从M序列 中截取一个周期形成的码截取位置任意，但性能不一样。

二、模糊函数







二、自相关函数特性 $\chi_2(m,0)=\sum_{i=0}^{P-1-m} c_i c_{i+m}$

+ - + + - - - 原序列

- - - + + - + 镜像序列

- + - - + + +
- + - - + + +
- + - - + + +
+ - + + - - -
+ - + + - - -
- + - - + + +
+ - + + - - -

代数和

-1，0，-1，0，-1，0，7，0，-1，0，-1，0，-1

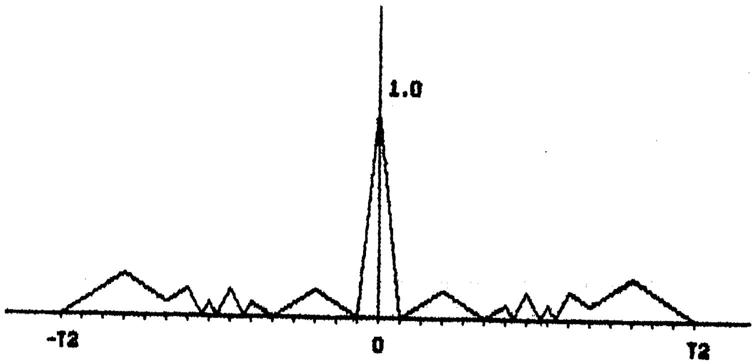
截断序列{+ - + + - - -}：[7，0，-1，0，-1，0，-1]；

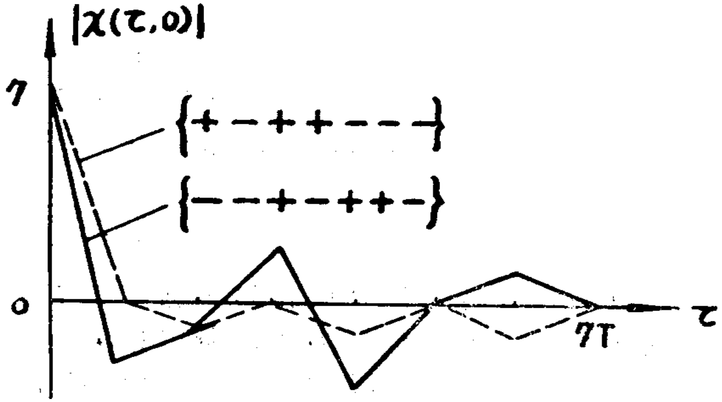
{- - + - + + -}：[7，-2，-1，1，-3，0，1]

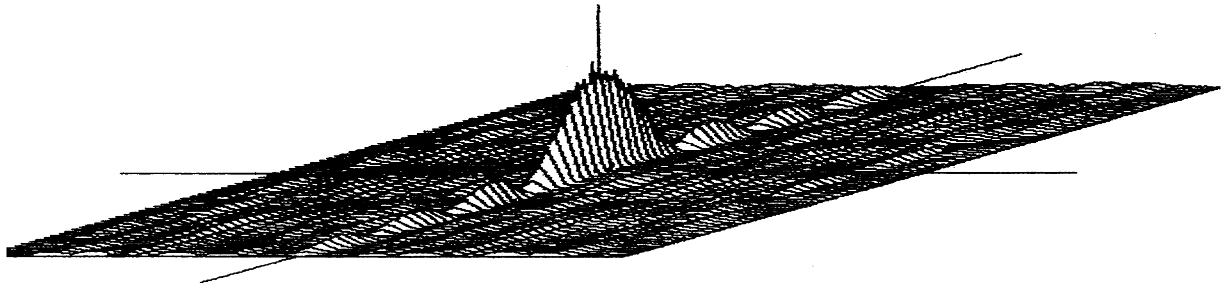
{- + - + + - -}：[7，-2，-1，0，-1，0，1]

结论：①自相关函数非双值电平，旁瓣与截取位置有关；

② $MSR \approx 20\log\sqrt{p}(p>>1)$ ；③非周期；④用公式算。

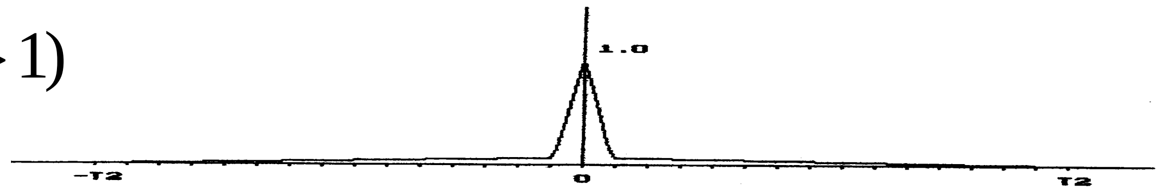


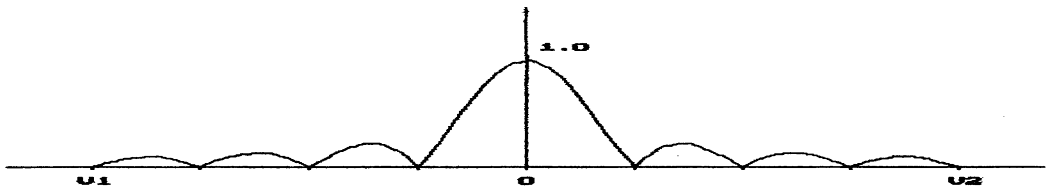




三、PN截断码集

$$MSR \approx 20\log p(p>>1)$$





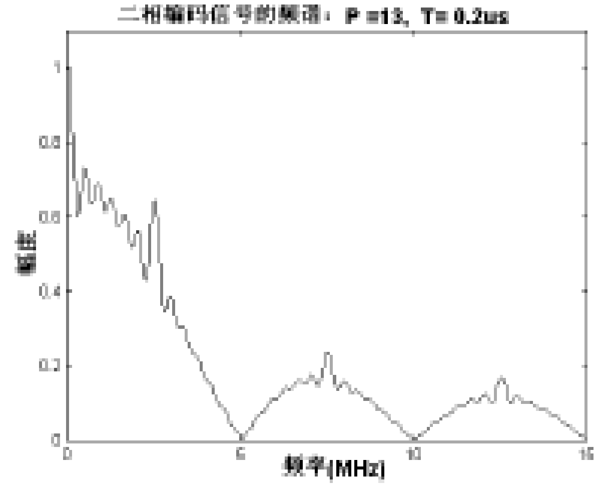
6.4 巴克（Barker）序列

一、定义

$$\chi_2(m,0)=\sum_{K=0}^{P-1-m} c_K c_{K+m}=\begin{cases} P & m=0 \\ \pm 1或0 & m\neq 0 \end{cases}$$

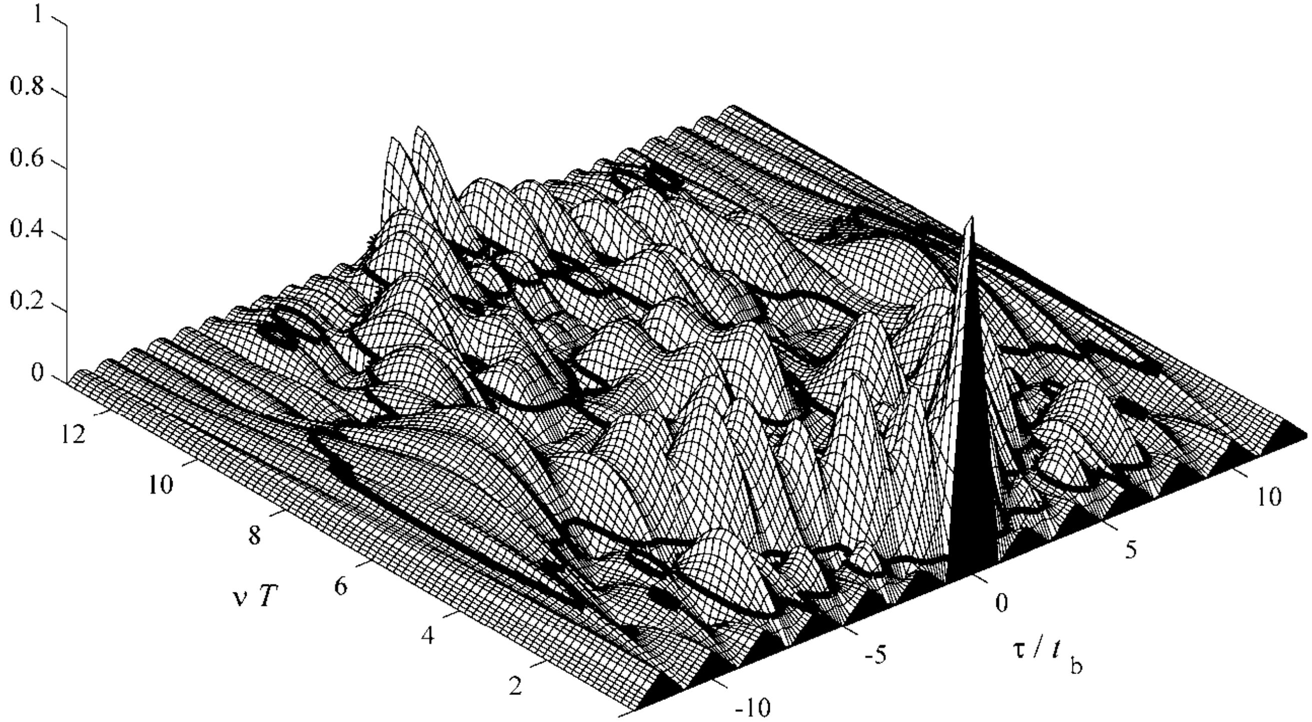
二、频谱（13位巴克码为例）

$$\left|\frac{\mu(f)}{T}\right|=\frac{1}{\sqrt{PT}}\left|\sin c(fT)\right|\cdot\left[\left|12+\frac{\sin(13\times 2\pi fT)}{\sin 2\pi fT}\right|\right]^{1/2}$$



三、模糊函数

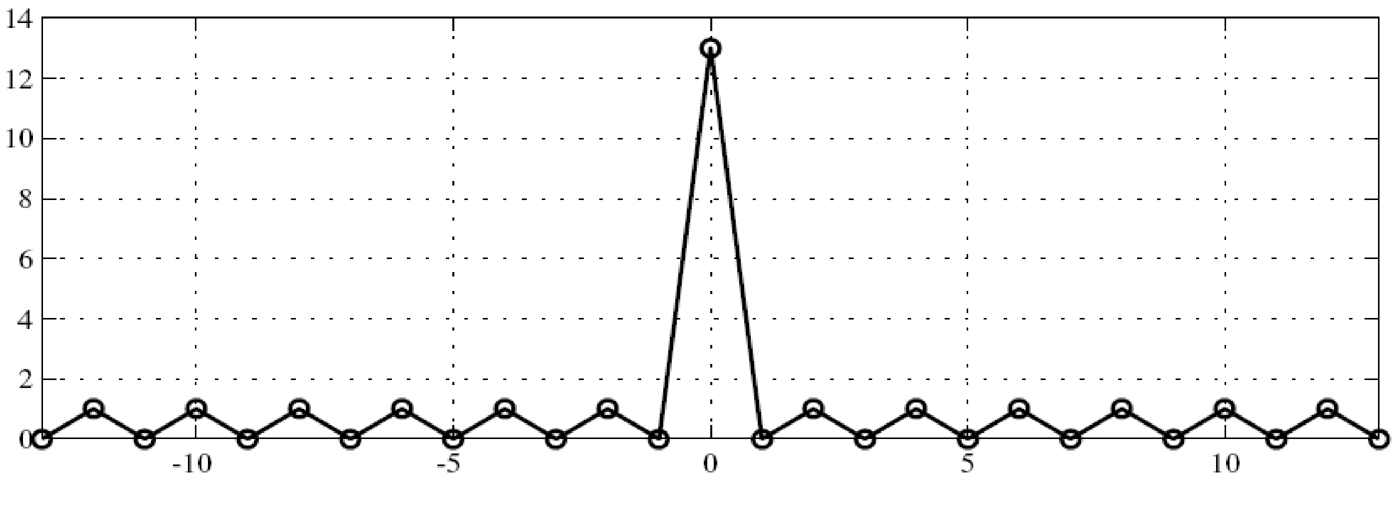
特点：①②③



四、自相关函数

主旁瓣比（MSR）：22.3dB

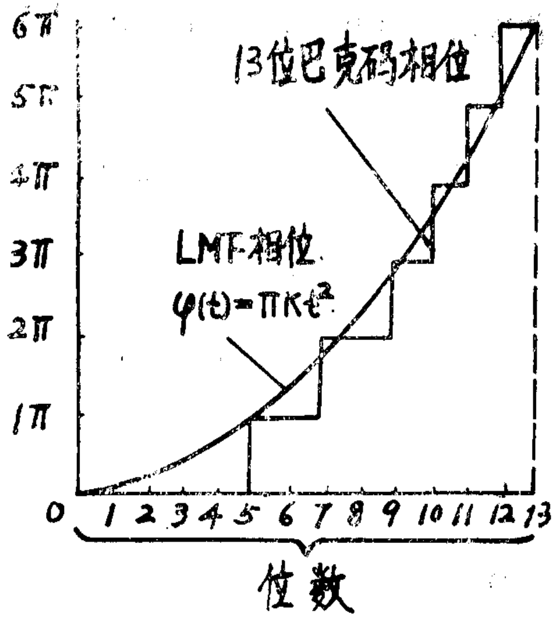
特点：①②③



五、性能

13位巴克码和同样时宽线性调频信号比较。

1、距离分辨力高



$\varphi(t)=0$　1—5 T

$\varphi(t)=\pi$　6—7 T

$\varphi(t)=2\pi$　8—9 T

$\varphi(t)=3\pi$　10T

$\varphi(t)=4\pi$　11T

$\varphi(t)=5\pi$　12T

$\varphi(t)=6\pi$　13T

$$\pi K\Delta^2 = 6\pi \text{或} K = \frac{6}{\Delta^2}$$

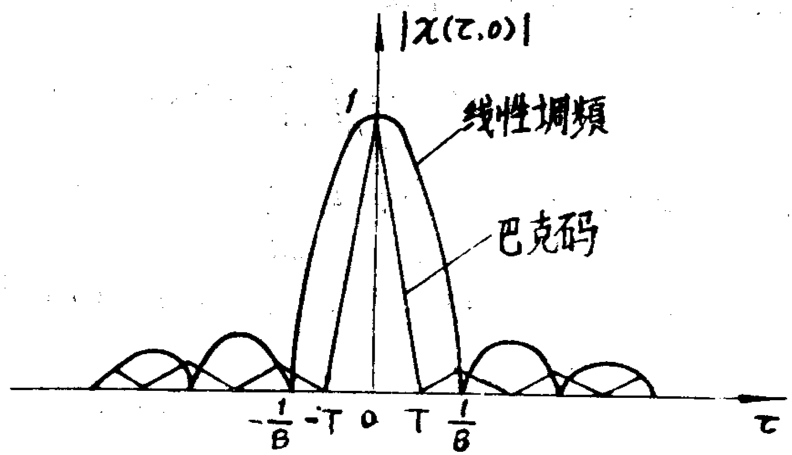
$$B = K\cdot\Delta = \frac{6}{\Delta} = 4\left(\frac{3}{2\Delta}\right)$$

$$W_{\text{线}} = B = 4\left(\frac{3}{2\Delta}\right)$$

$$W_{\text{巴}} = 12.1\left(\frac{3}{2\Delta}\right)$$

自相关函数 $|\chi(\tau,0)|$

$$\frac{1}{B}=\frac{\Delta}{6}=\frac{13T}{6}\approx 2T$$



2、速度分辨力相同

两种信号的时宽相同时，其速度分辨力相同，因为它们的有效时宽都是由时宽 $T_{e线}=T_{e巴}=\Delta$ 决定。（模糊图在多普勒轴交点相同）

3、测距精度高

$$\beta_{0巴}\cong\sqrt{\frac{2B}{T}}=\sqrt{\frac{2}{T^2}}\quad \beta_{0线}=\sqrt{\frac{(\pi B)^2}{3}}=\sqrt{\frac{\pi^2}{3}\cdot\frac{1}{4T^2}}\quad \beta_{0巴}=\frac{\sqrt{2}}{T}=\frac{2}{\pi}\sqrt{6}\cdot\beta_{0线}=1.56\beta_{0线}$$

4、$MSR_{巴}=-22.3dB\quad MSR_{线}=-13.2dB$

5、旁瓣电平

6、压缩比

7、多普勒敏感信号

8、码型捷变

6.5 增加巴克码长度的方法

一、概念

组合巴克码就是用某一个巴克码作为基本码元〔称为内码〕，组成另一个新的巴克码〔称为外码〕。

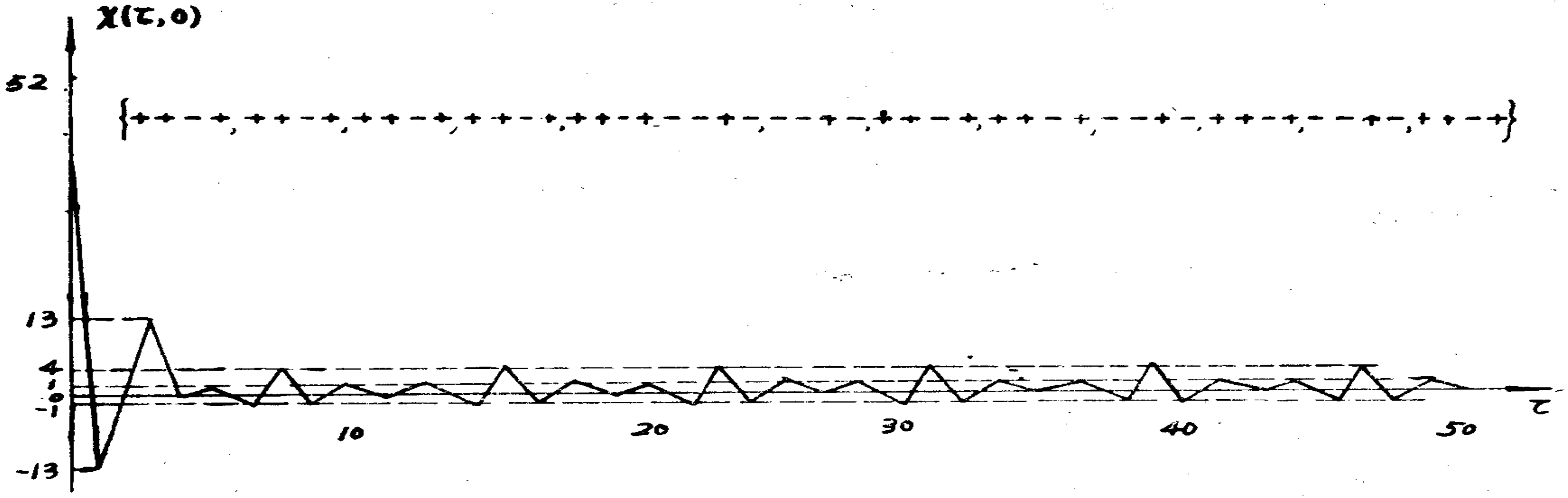
$$B_0(13)=\{B_i(4),B_i(4),B_i(4),B_i(4),B_i(4),$$
$$-B_i(4),\text{-}B_i(4),B_i(4),B_i(4)\text{ - }B_i(4),B_i(4),$$
$$\text{- }B_i(4),B_i(4)\}$$

[++-+，++-+， ++-+， ++-+， ++-+，- -+-， - -+-， ++-+， ++-+，
 - -+-， ++-+， - -+-， ++-+，]

二、自相关函数计算

①公式 $$R(\tau)=R_0(K)\cdot R_i(\tau-KL_i)+R_0(K+1)\cdot R_i[(K+1)L_i-\tau]$$

$$K=0,1,,2,\cdots(L_0-1),\tau=0,1,2,\cdots(L_0L_i-1),KL_i\le\tau\le(K+1)L_i$$



②简便法

原则：a. 把外码和内码的自相关函数相乘； 即用外码的自相关函数的每个值，逐项对内码自相关函数值进行加权；

b. 把乘积按内码长度进行分段；

c. 找出对称轴，用“对称迭加”对相关值进行修正。

例如：R0=[3,0,-1],Ri=[2,-1]

[3,0,-1] ×[2,-1]

[6,-3｜ 0,0｜ -2,1]

修正后：[6,-3｜ 0,1｜ -2,1]

例如：R0=[4，-1，0，1]，Ri=[3，0，-1]

[4，-1，0，1] ×[3，0，-1]

=[12，0，-4| -3，0，1| 0，0，0| 3，0，-1]

修正后：[12，1，-4，-3，0，1，0，-1，0，3，0，-1]

③按 $\chi_2(m,0)=\sum_{i=0}^{P-1-m} c_i c_{i+m}$

结论：①②③④

6.6 二相编码信号的处理

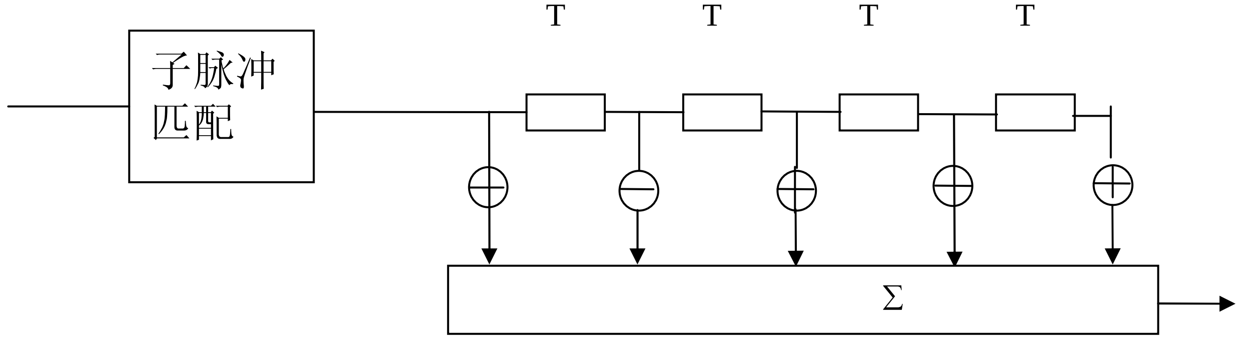
一、匹配滤波器特性

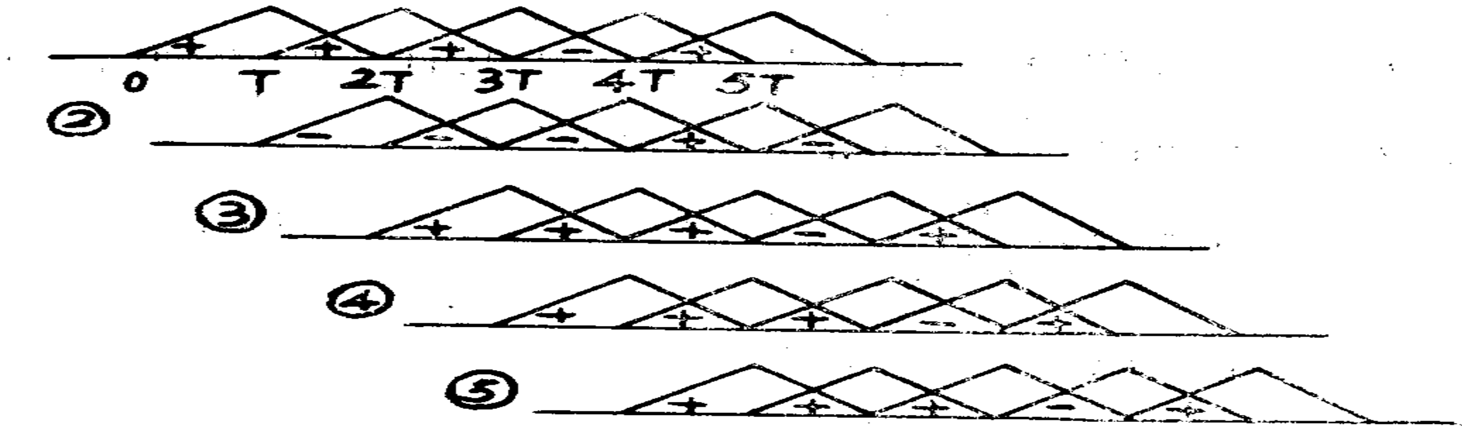
$$\mu*(f)=\sqrt{\frac{T}{P}}\sin c(fT)e^{j\pi fT}\sum_{K=0}^{P-1}c_K e^{j2\pi fKT}=\mu_1*(f)\cdot\mu_2(f)$$

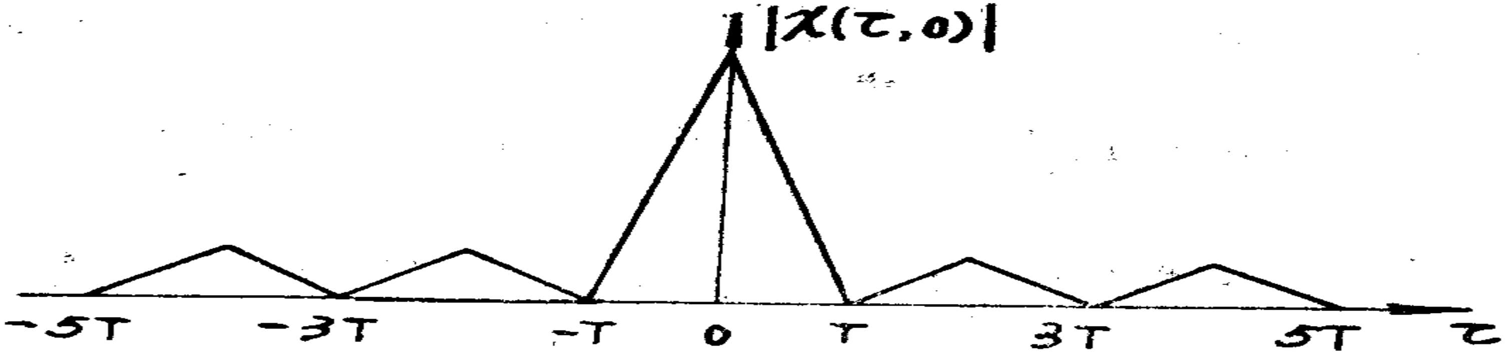
$$H(f)=\mu*(f)e^{-j2\pi ft_0}$$

$$=\mu_1*(f)\cdot\mu_2(f)\cdot e^{-j2\pi ft_0}=\mu_1*(f)\cdot\mu'_2(f)$$

$$\mu_1*(f)=\sqrt{\frac{T}{P}}\sin c(fT)e^{j\pi fT}\qquad \mu'_2(f)=\sum_{K=0}^{P-1}c_{(P-1)-K}e^{-j2\pi f(KT)}$$


子脉冲匹配
T
T
T
T
Σ


0
T
2T
3T
4T
5T
②
③
④
⑤

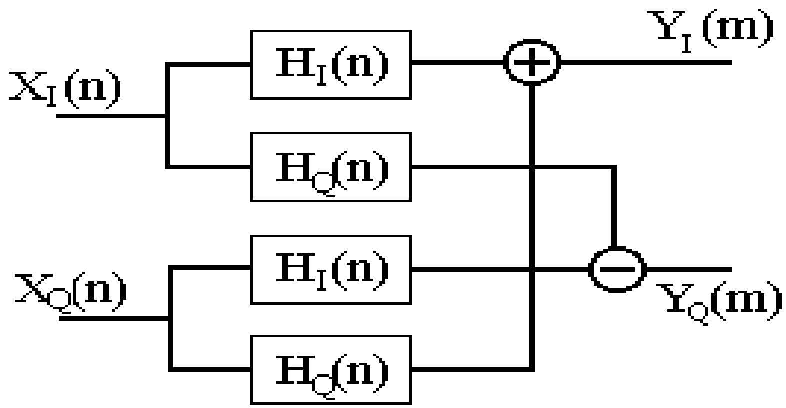

|χ(τ,0)|
-5T
-3T
-T
0
T
3T
5T
τ

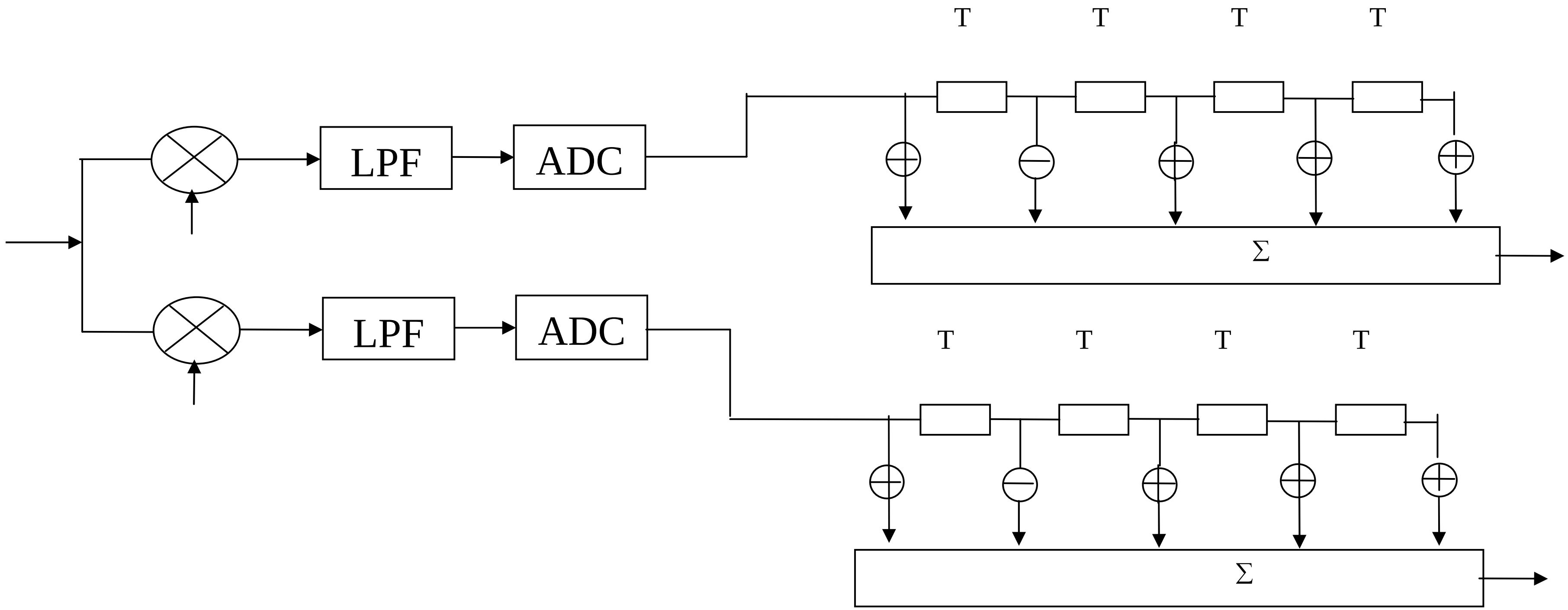
二、二相编码信号的处理方法

1、4路变2路

2、时域处理

3、采样频率





信号处理增益（信噪比提高）

$$S_o/N_o = P/\sigma_i\sqrt{P} = \sqrt{P}/\sigma_i \qquad S_i/N_i = 1/\sigma$$

$$20\log\frac{S_o/N_o}{S_i/N_i} = 20\log\sqrt{P} = 10\log P$$

提高MSR方法:①抑制旁瓣；②捷变积累。

三、组合巴克码的处理

外码匹配滤波器：延迟时间为PT（P为内码码长）

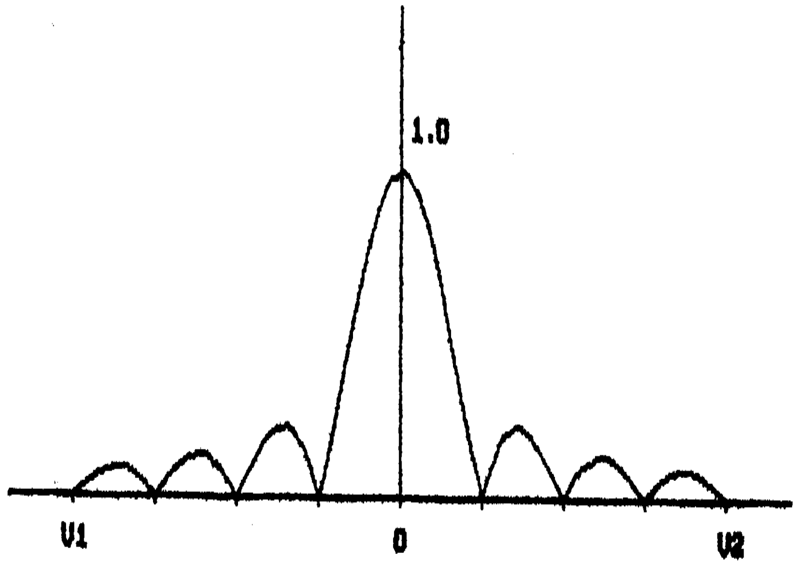
内码匹配滤波器：与普通一样

6.7 二相编码信号多普勒敏感问题

一、概念

当存在多普勒频率时，主峰要下降，旁瓣要增加，主旁瓣比要降低。

二、影响主旁瓣比的因素



主峰的变化:

1、M序列：处理时间

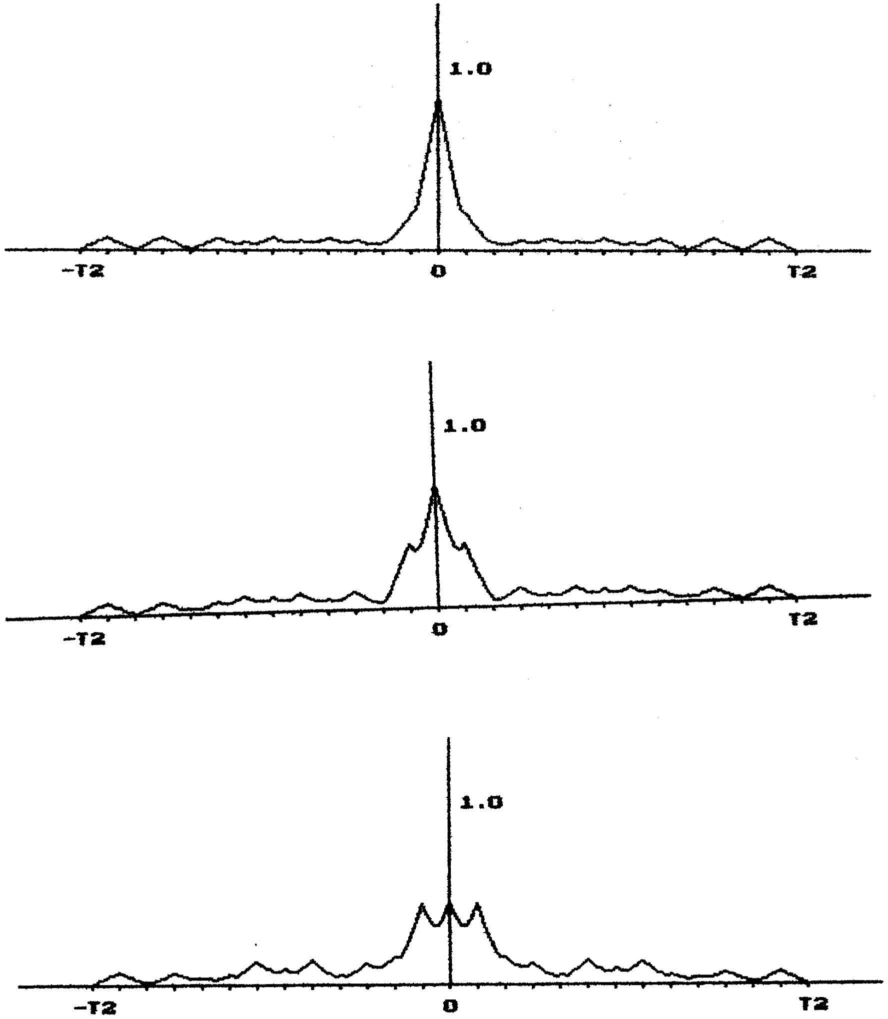
2、PN码：PT

3、PN码集：PTr

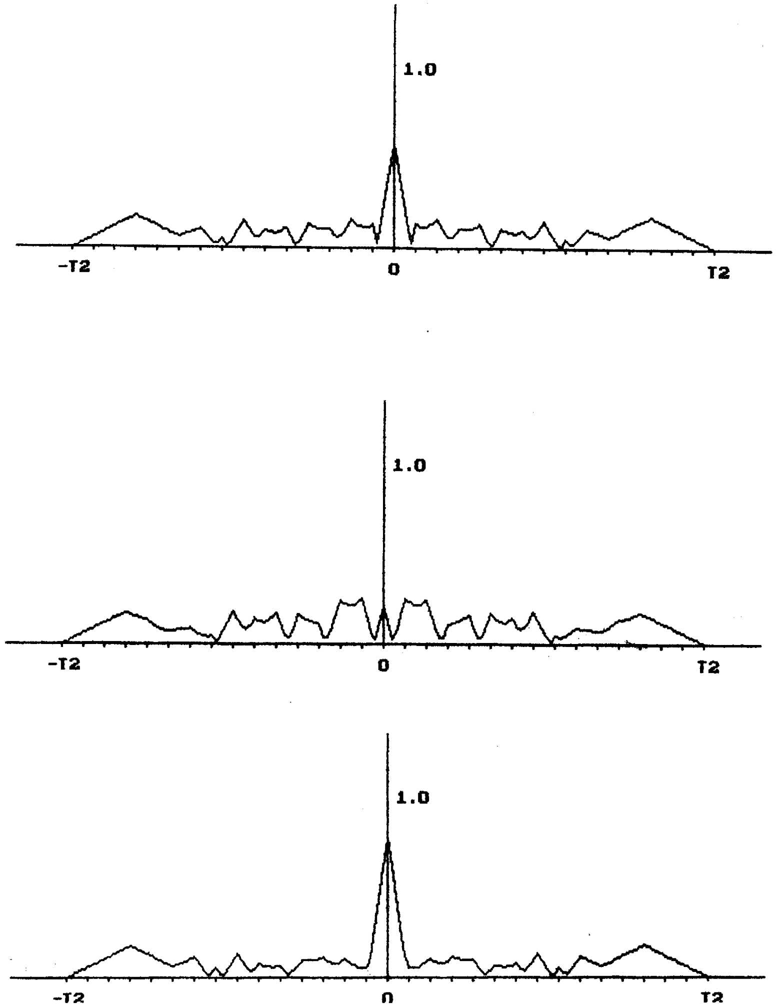
4、Barker码：PT

5、互补码PT(频分/时分)

与压缩比D（P）、子脉冲宽度T、重复周期Tr有关。



13位巴克码的模糊图切割



15位PN截断码的模糊图切割

三、解决方法

1、多普勒补偿（变本振）：静止目标变运动，影响对消

2、修正匹配滤波器（移动模糊图原点）：匹配滤波器太多

3、消除多普勒电路：非线性，影响邻近分辨

4、补偿式旁瓣抑制滤波器：对应失配输出进行抑制

6.8 多相编码信号简介

一、概念

二相编码信号：BPSK；四相编码信号：QPSK，多相编码信号。

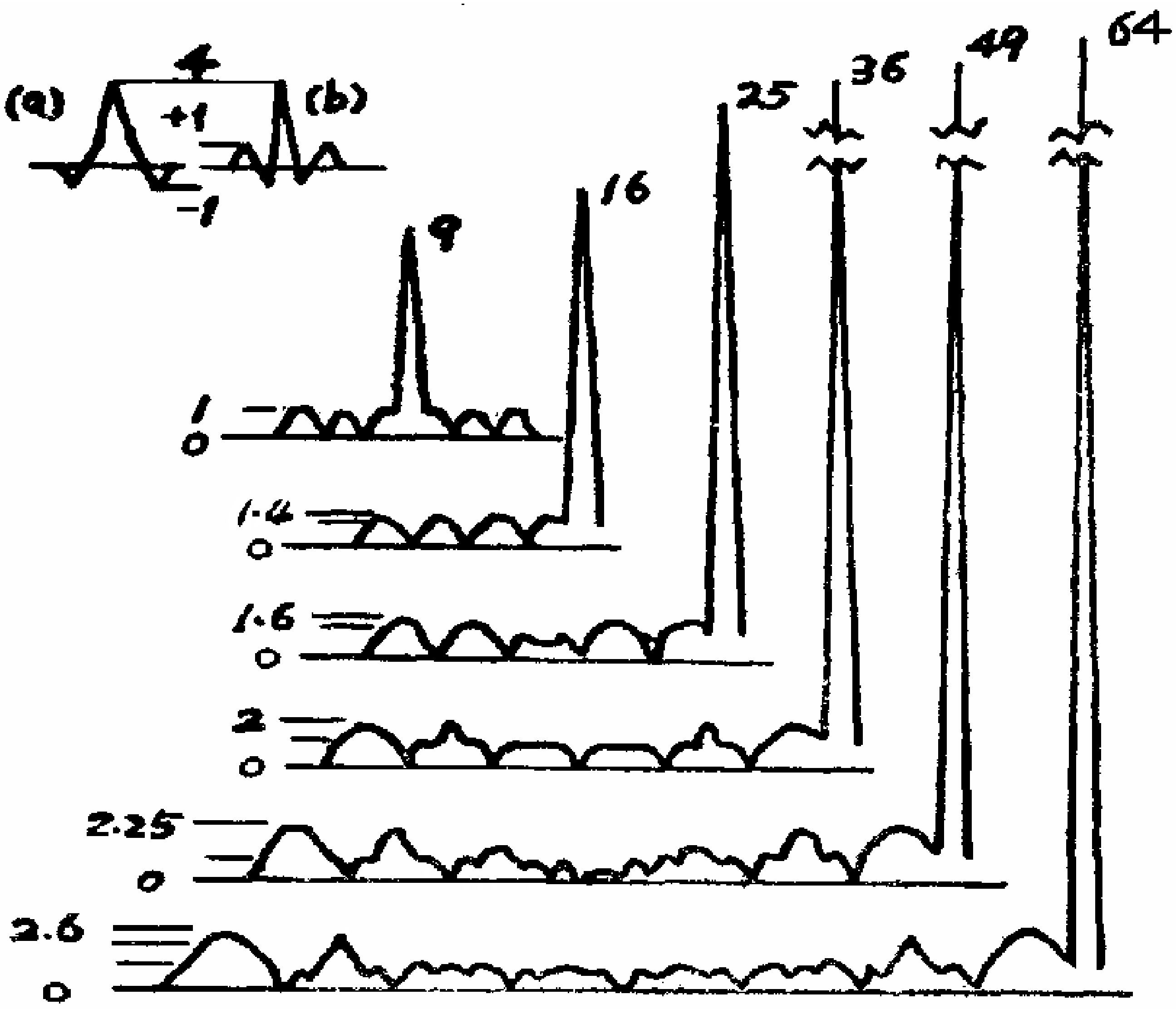
二、弗兰克[Frank]多相编码（基本相移：$2\pi / N$）

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 2 \end{pmatrix} \quad 或 \quad \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

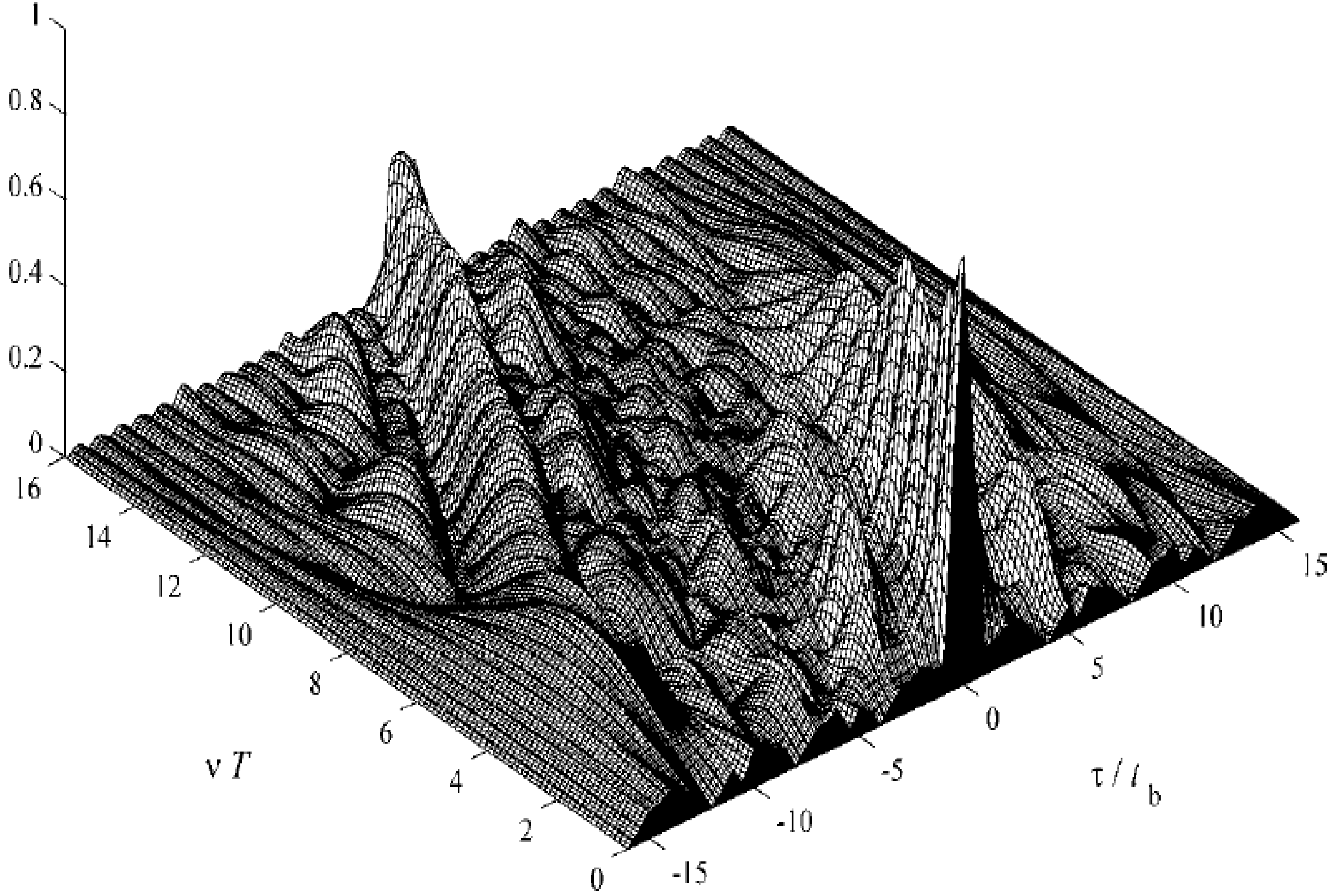
$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots\cdots & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & \cdots\cdots & (N-1) \\ 0 & 2 & 4 & 6 & \cdots\cdots & 2(N-1) \\ 0 & 3 & 6 & 9 & \cdots\cdots & 3(N-1) \\ \cdots\cdots & \cdots\cdots & \cdots\cdots & \cdots\cdots & \cdots\cdots & \cdots\cdots \\ 0 & (N-1) & 2(N-1) & & \cdots\cdots & (N-1)^2 \end{pmatrix}$$

$$\{\varphi_K\} = \left\{0,0,0,0,\frac{2\pi}{3},\frac{4\pi}{3},0,\frac{4\pi}{3},\frac{2\pi}{3}\right\}$$

$$\{c_K\} = \left\{1,1,1,1,e^{j\frac{2\pi}{3}},e^{j\frac{4\pi}{3}},0,e^{j\frac{4\pi}{3}},e^{j\frac{2\pi}{3}}\right\}$$



(a)
4
+1
-1
(b)
9
16
25
36
49
64
1
0
1.4
0
1.6
0
2
0
2.25
0
2.6
0



1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
16
14
12
10
8
6
4
2
0
ν T
-15
-10
-5
0
5
10
15
τ / t b

作 业

1、写出由4位巴克码[+ + - +]作为基本码元（内码），组成一个新的7位巴克码[+ + + - - + -]（外码）的编码形式，计算出该码的距离自相关函数，并绘出处理系统的结构示意图。

2、PN截断码序列和M序列的距离自相关函数有何区别？

3、以M序列信号处理方法为例，说明相关器和匹配滤波器的关系。