

第7章 相干脉冲串信号

7.1 相干脉冲串信号

7.2 均匀脉冲串信号的频谱

7.3 均匀脉冲串信号的模糊函数

7.4 均匀脉冲串信号的处理

7.5 均匀脉冲串信号的性能

7.6 其它脉冲串信号

7.1 相干脉冲串信号

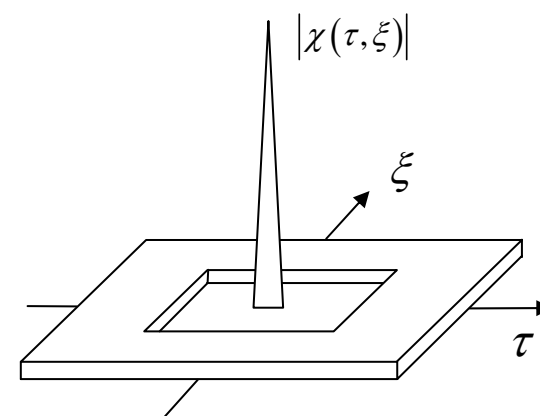
一、概述

一定分布范围($\Delta\tau, \Delta\xi$)内除主峰外无体积。

相干脉冲串信号：子脉冲高频相位有特定关系。

特点：

- 保留了脉冲信号高距离分辨力的特点，又有连续波信号的速度分辨性能；
- 可控参数多，且灵活可控，便于作为自适应控制信号；
- 在不减小**B**的前提下，靠增加**N**来增加**T**，其模糊图通过编码等技术几乎可以做成任意形式。

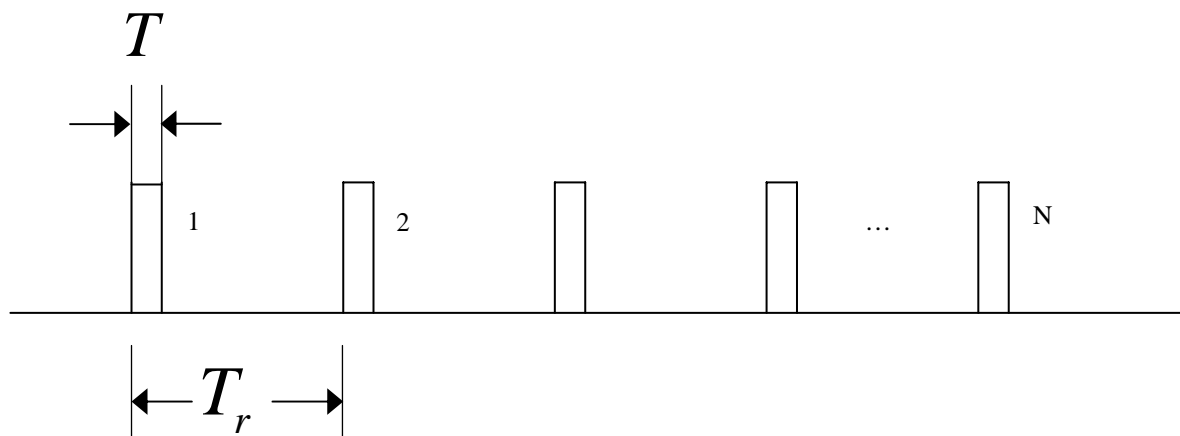


二、定义

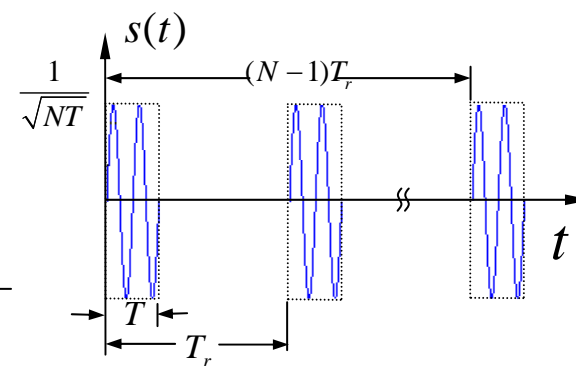
均匀脉冲串信号：脉冲串中子脉冲的幅度恒定，子脉冲的重复周期和宽度也恒定的脉冲串信号。

$$\mu(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} \mu_1(t - iT_r)$$
$$\mu_1(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{T}} & 0 \leq t < T \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$\mu(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} c_i \mu_1(t - iT_r)$$



均匀脉冲串信号的视频信号波形



均匀脉冲串信号的高频波形

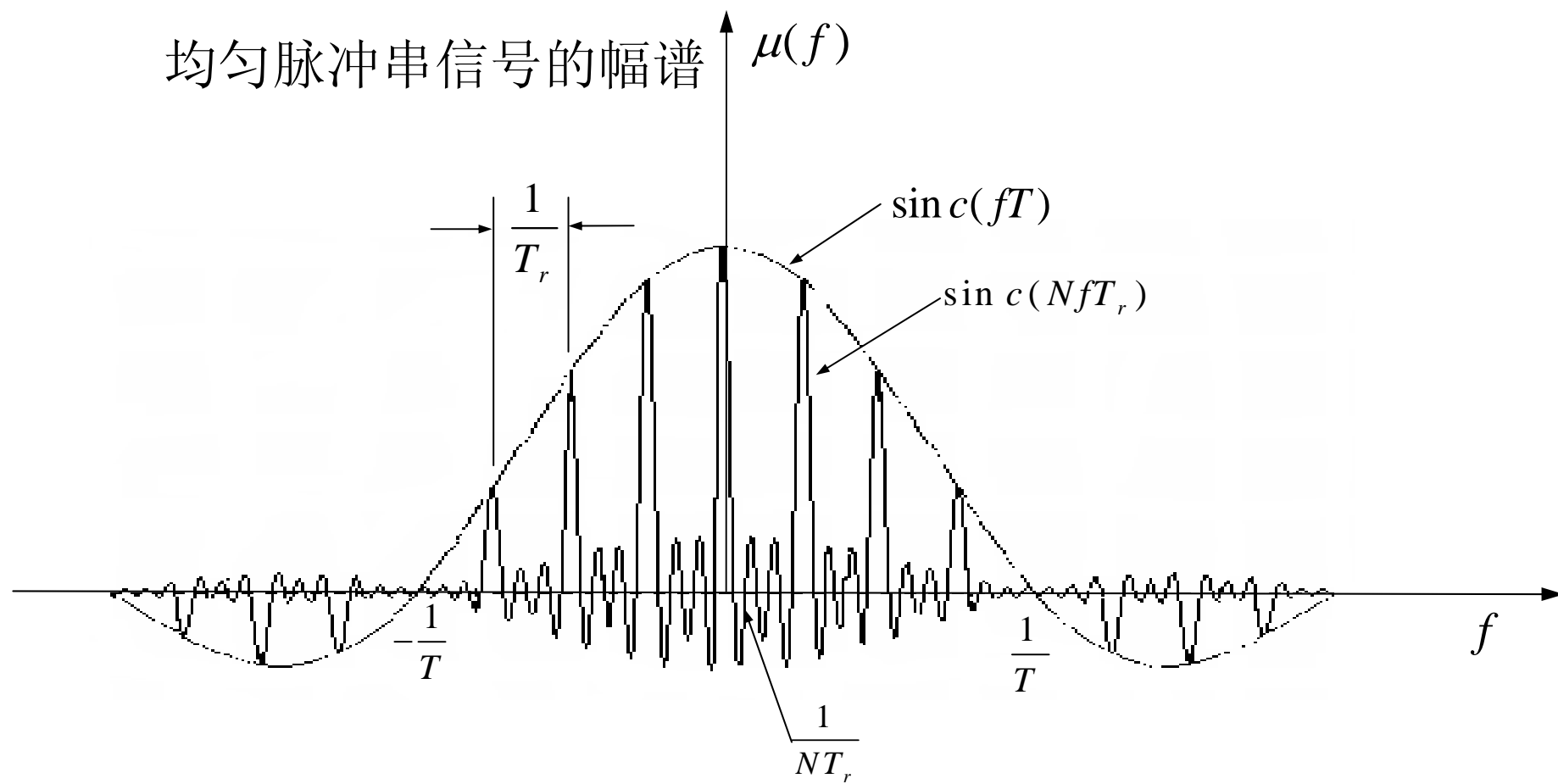
7.2 均匀脉冲串信号的频谱

均匀脉冲串信号的频谱：

$$U(f) = \sqrt{\frac{T}{N}} \operatorname{sinc}(fT) \frac{\sin(N\pi fT_r)}{\sin(\pi fT_r)} e^{-j\pi f[(N-1)T_r+T]}$$
$$\approx \sqrt{\frac{T}{N}} \operatorname{sinc}(fT) N \operatorname{sinc}(NfT_r) e^{-j\pi f(NT_r+T)}$$

结论：①子脉冲频谱被因子加权；② $B = 1/T$ ；
③ B 、 Δ 独立选取；④梳齿状，齿距为 $1/T_r$ ，齿宽为 $2/NT_r$ 。

均匀脉冲串信号的幅谱



7.3 均匀脉冲串信号的模糊函数

一、模糊函数

根据模糊函数的性质，得复合自相关函数：

$$\begin{aligned}\chi(\tau, \xi) &= \frac{1}{N} \sum_{P=1}^{N-1} e^{j2\pi\xi PT_r} \chi_1(\tau + PT_r, \xi) \sum_{m=0}^{N-1-P} e^{j2\pi\xi mT_r} \\ &\quad + \frac{1}{N} \sum_{P=0}^{N-1} \chi_1(\tau - PT_r, \xi) \sum_{n=0}^{N-1-P} e^{j2\pi\xi nT_r} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{P=-(N-1)}^{N-1} \chi_1(\tau - PT_r, \xi) e^{j\pi\xi(N-1-P)T_r} \frac{\sin \pi\xi(N - |P|)T_r}{\sin \pi\xi T_r}\end{aligned}$$

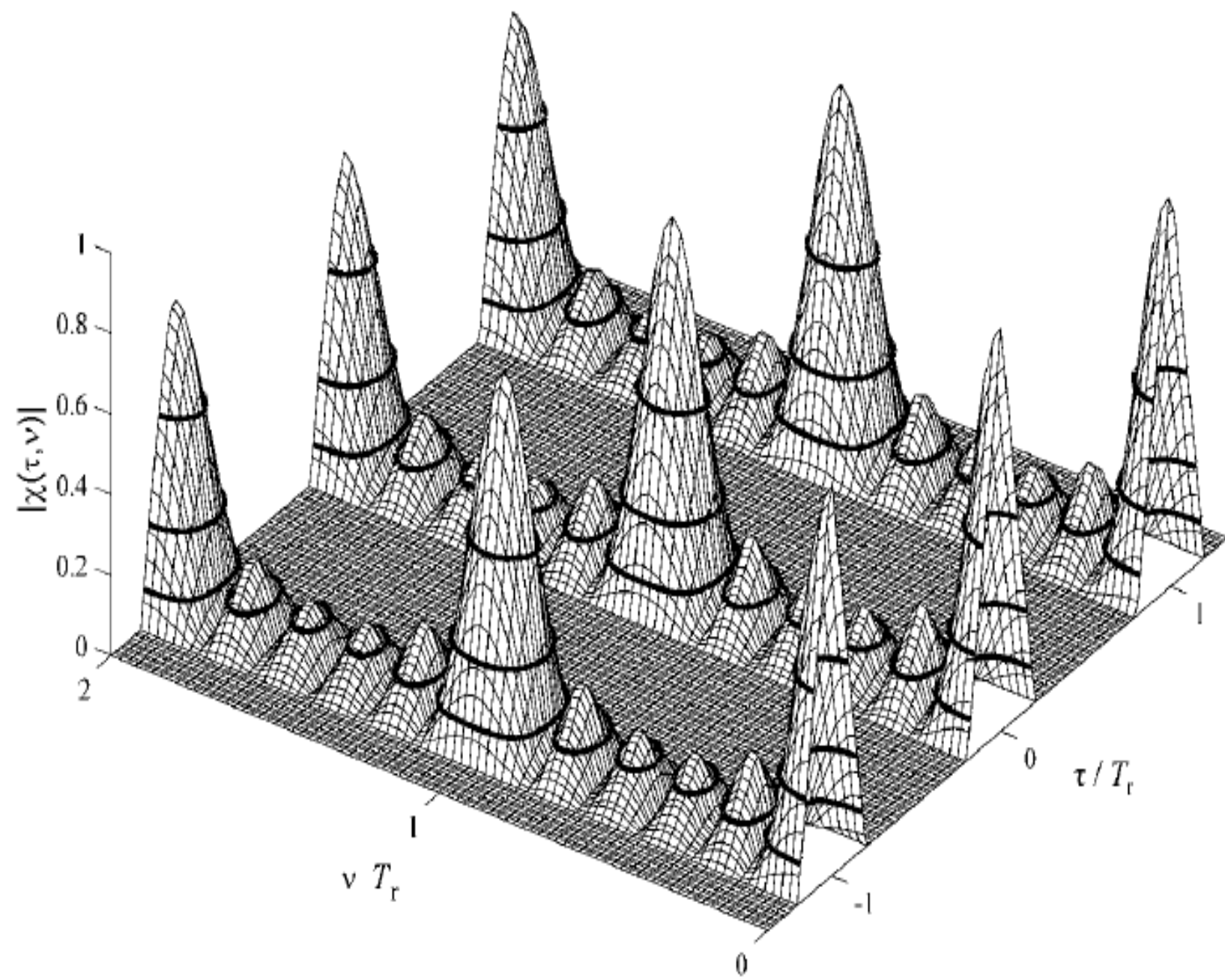
相干脉冲串信号的模糊函数为：

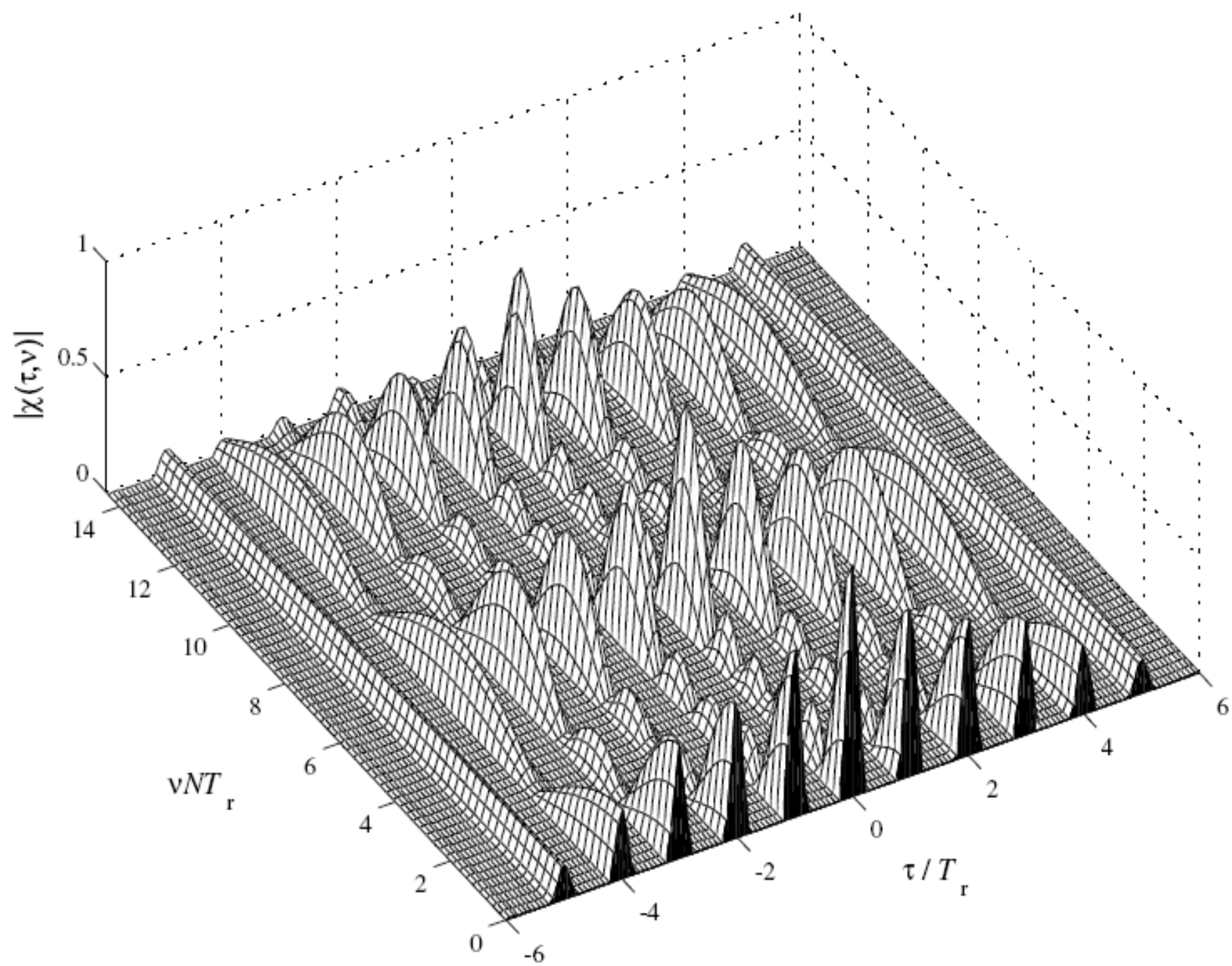
$$|\chi(\tau, \xi)| = \frac{1}{N} \sum_{P=-(N-1)}^{N-1} |\chi_1(\tau - PT_r, \xi)| \left| \frac{\sin \pi \xi (N - |P|) T_r}{\sin \pi \xi T_r} \right|$$

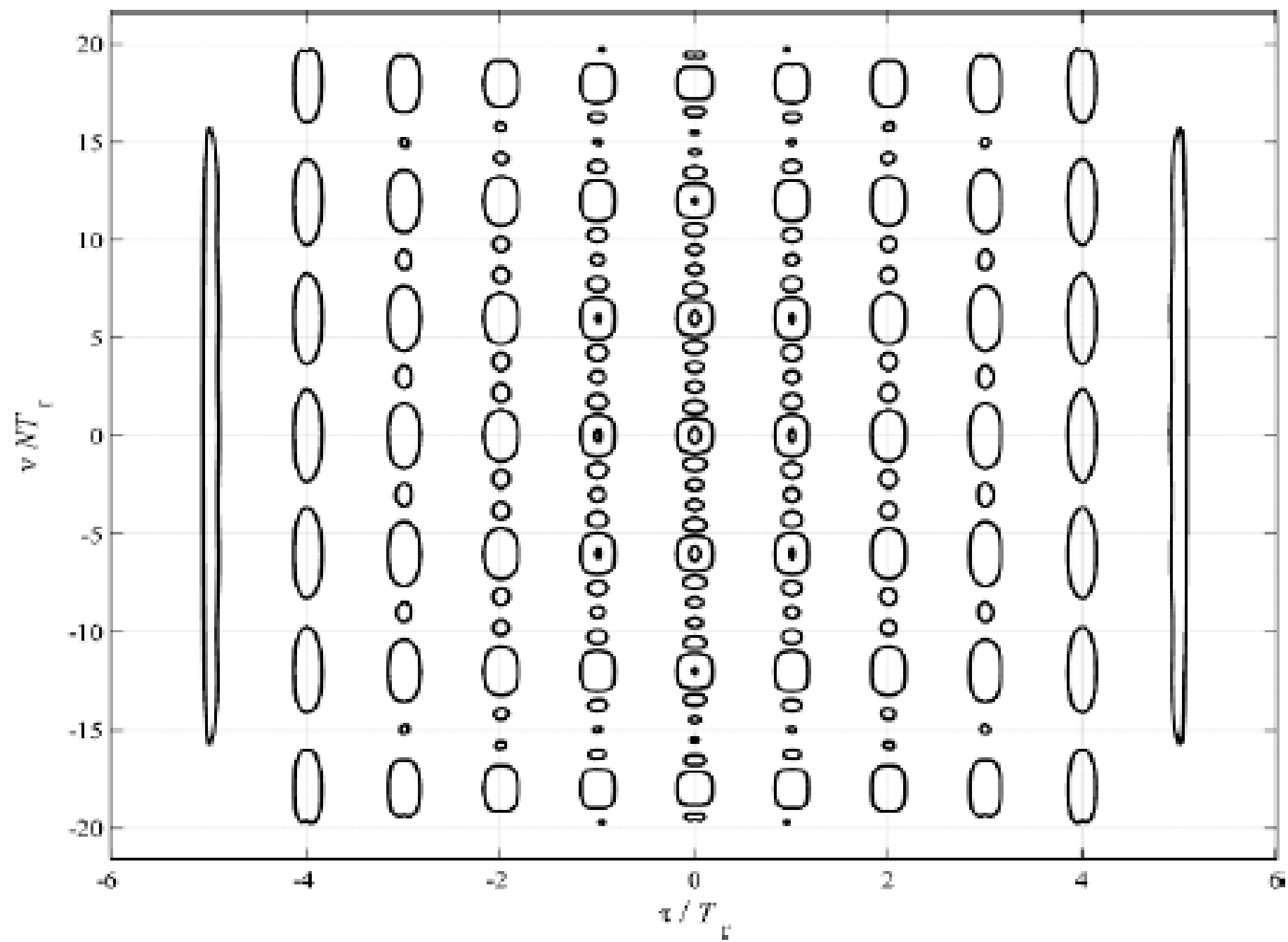
子脉冲模糊函数为：

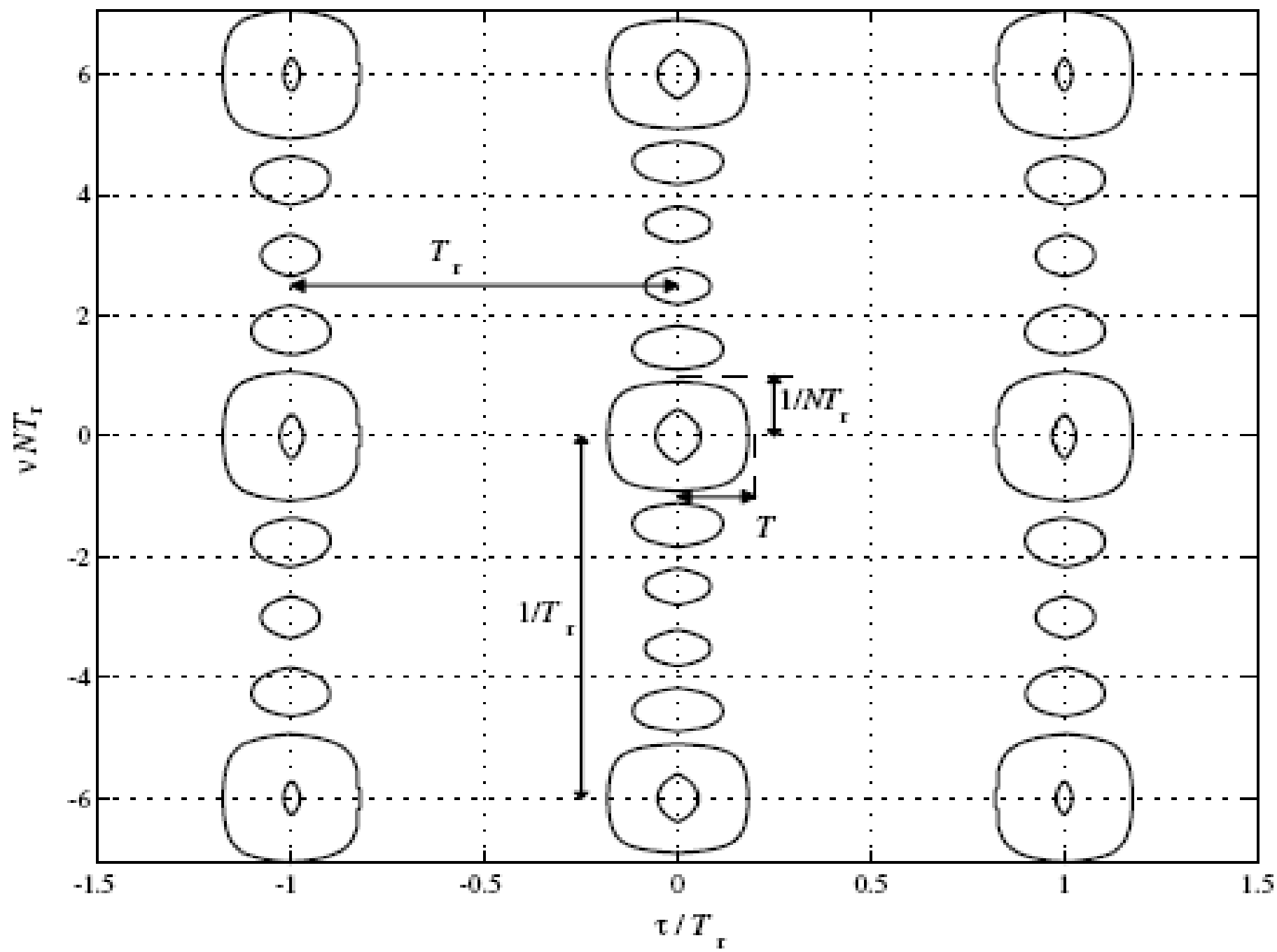
$$|\chi_1(\tau - PT_r, \xi)| = \begin{cases} \frac{\sin \pi \xi (T_p - |\tau - |P|T_r|)}{\pi \xi (T_p - |\tau - |P|T_r|)} \frac{T_p - |\tau - |P|T_r|}{T_p} & |\tau - |P|T_r| < T_p \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

结论：由在延迟轴上的一系列 P 取不同值的子脉冲模糊函数被因子加权后组成的。加权因子决定了模糊函数在平面上的分布情况。









中心部分的特点:

1. 模糊图的体积是分散的集中到平行 ξ 轴的许多带条内，在每个带条内都由规律的排列着许多尖峰（板钉型）。
2. 在平行的带条之间存在着空白带条（没有体积），空白带条不产生“自身杂波”，空白带条的宽度为 $T_r - 2T$ 。
3. 有体积带条的宽度为子脉冲宽度的两倍 $2T$ ，带条数目为 $2N - 1$ 个。
4. 在每个有体积的带条内，都存在许多速度（多普勒）模糊瓣，模糊瓣之间的距离为 $1/T_r$ 。在模糊瓣之间又存在多普勒小旁瓣，最小旁瓣的最大值出现在 $1/2T_r$ 处，这些小旁瓣构成了带条内的“自身杂波”。

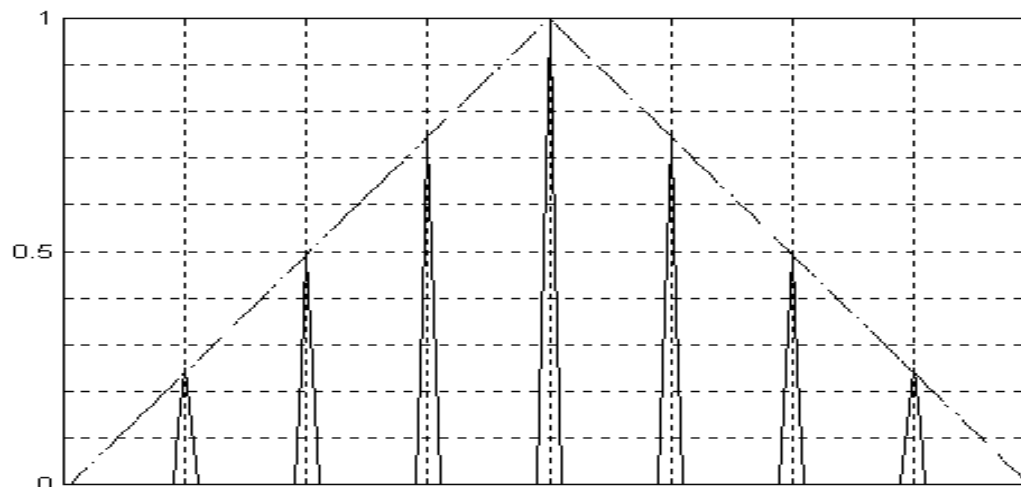
思考题：① $N=1$, ② $T_r=T$ 、 $C_0=C_1=C_2\dots$, ③ $T_r=T$ 、 $C_0 \neq C_1 \neq C_2\dots$,

④ $T_r > T$ 、 $C_0 \neq C_1 \neq C_2\dots$, ⑤ $T_r > T$ 、 $C_0=C_1=C_2\dots$

二、切割

1、 $\xi = 0$

$$|\chi(\tau, 0)| = \sum_{P=-(N-1)}^{N-1} |\chi_1(\tau - PT_r, 0)| \left(\frac{N - |P|}{N} \right)$$



结论： ① $p=0$ ，中心条由 N 个 $\chi_1(\tau, 0)$ 迭加而成； ② $p \neq 0$ ，其它条迭加数目按 $(N - |p|)$ 减少； ③ $N \gg 1$ ， $(N - |p|)$ 随 p 慢变。

$$2、\xi = \frac{K}{T_r}$$

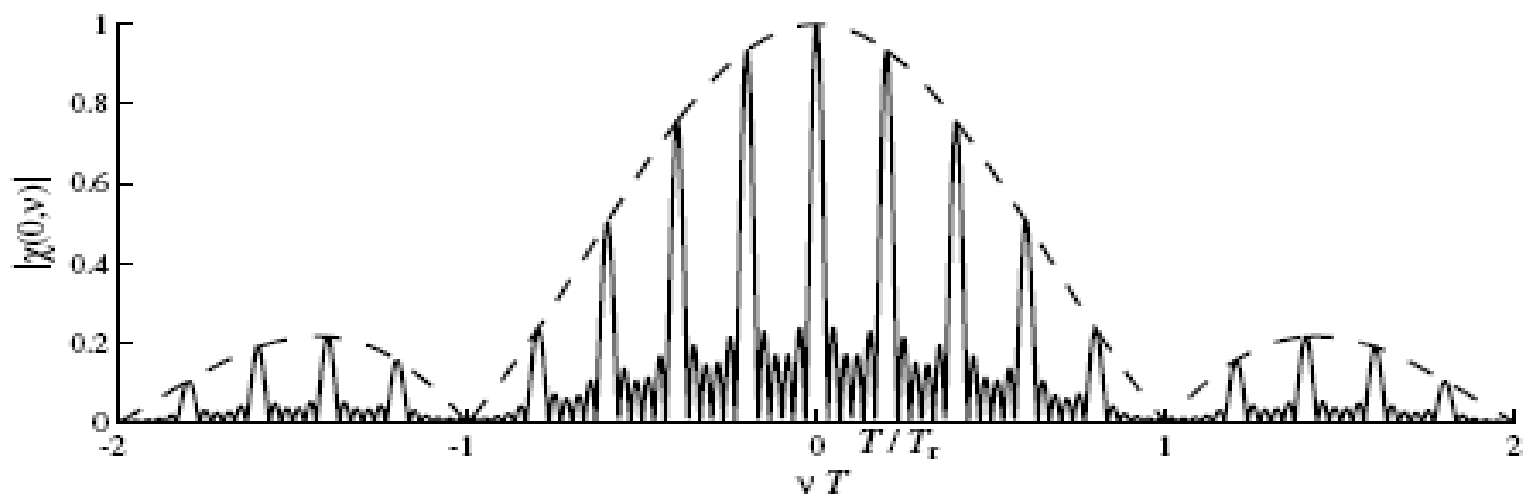
$$\left| \chi\left(\tau, \frac{K}{T_r}\right) \right| = \sum_{P=-(N-1)}^{N-1} \left| \chi_1\left(\tau - P T_r, \frac{K}{T_r}\right) \right| \left(\frac{N - |P|}{N} \right)$$

各带条中的模糊瓣幅值随p的变化规律还是受因子 $[N - |p|]$ 加权，与 $\xi=0$ 时变化规律相同。

3、令 $\tau = 0, p = 0$ (中心带条)

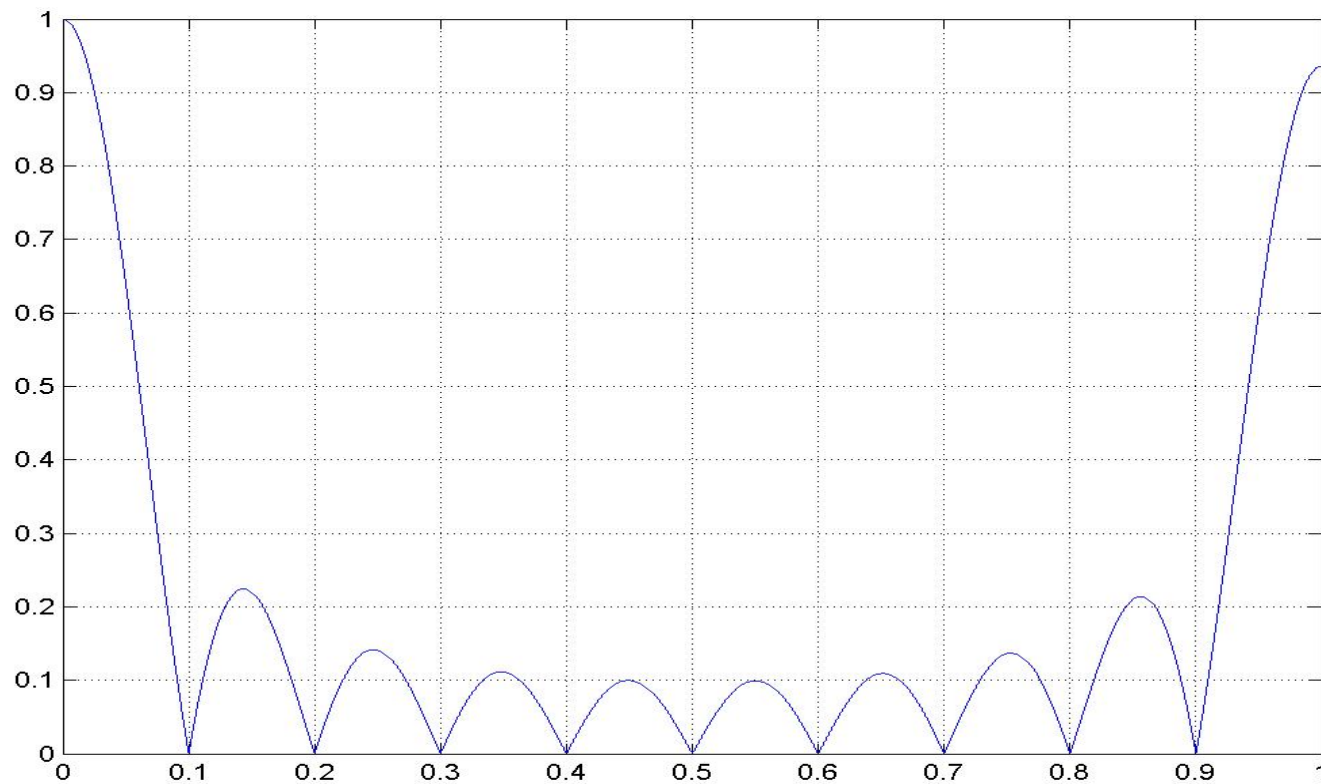
$$|\chi(0, \xi)| = \frac{1}{N} |\chi_1(0, \xi)| \left| \frac{\sin \pi \xi N T_r}{\sin \pi \xi T_r} \right|$$

$$\approx \frac{1}{N} |\sin c(\xi T)| N |\sin c(N \xi T_r)|$$



结论：与频谱完全一样。

下面观察 $0 \sim \frac{1}{T_r}$ 的细微结构（最小点在 $\frac{1}{2T_r}$ 处，幅值为模糊瓣幅值的 $\frac{1}{N}$ ）。



4、 $\tau = kT_r, p \neq 0$

加权因子 $\left| \frac{\sin \pi \xi (N - |p|) T_r}{\sin \pi \xi T_r} \right|$ 与 τ 无关，在其它带条内

切割，幅值与中心带条不同，外貌相同。注意：

- ①随着 p 的增加〔即远离中心带条〕，带条中速度模糊瓣的宽度要增加，增加的规律是 $\frac{1}{[N - |p|] T_r}$ ；
- ②在离中心带条最远的带条内，由于模糊瓣的加宽，使模糊瓣彼此重迭，因而就不出现分裂现象；
- ③在每个带条内的多卜勒旁瓣数目是不同的，随着 p 的增加而逐渐减小，其减小的规律是 $[N - |p| - 2]$ ；
- ④ $N \gg 1$, 理想板钉形。

7.4 均匀脉冲串信号的性能

具有窄脉冲信号距离分辨力好，测距精度高的特点；又具有连续波信号速度分辨力好，测速精度高的特点。

一、距离分辨力、速度分辨力

$$W_e = \frac{3}{2} \frac{1}{T} \quad T_e = NT_r \quad \frac{T_e'}{T_e} = \frac{NT_r}{T}$$

二、测距精度、测速精度

$$\beta_0^2 = \frac{2B}{T} \quad \frac{\delta_s^2}{\delta^2} = \frac{\frac{(\pi NT_r)^2}{3}}{\frac{(\pi T)^2}{3}} = \frac{(NT_r)^2}{T^2}$$

增大 Tr 可提高速度分辨力和测速精度，又可增大不模糊测距范围，但会减小不模糊测速范围。反之则。。。

因此， Tr 在不模糊测距、测速范围上折衷！

1、MTI/MTD雷达

在杂波背景中检测运动目标，不测速，距离不模糊，因此选择大 T_r 。

2、PD雷达

在杂波背景中检测运动目标，要测速（分辨力和精度），速度不模糊，但存在距离模糊，因此选择小 T_r 。

采用各种措施来消除距离或速度模糊如 T_r 参差！

当 T_r 选定后，距离分辨力、速度分辨力、测距精度、测速精度可通过选择合适的 T 和 N 来达到。

例： $\Delta R = 2\text{Km}$, $\Delta V_R = 10^4\text{m/s}$, $f_0 = 10^9\text{Hz}$ ，如何选取 N 、 T_r 、 T ？

$$A_r \leq 0.1\mu\text{s}, A_\xi \leq 3\text{KHz}$$

$$\Delta R \rightarrow \frac{2\Delta R}{c} = 13.3\mu\text{s}, \Delta V_R \rightarrow \frac{2\Delta V_R f_0}{c} = 0.67 \times 10^5\text{Hz} \rightarrow 14.9\mu\text{s} \rightarrow T = 14\mu\text{s}$$

$$A_r = \frac{2}{3}T \leq 0.1\mu\text{s} \rightarrow T = 0.1\mu\text{s}$$

$$A_\xi = \frac{1}{NT_r} \leq 3\text{KHz} \rightarrow N \geq \frac{1}{3 \times 10^3 \times T_r} = 23.8 \rightarrow N = 24$$

7.5 均匀脉冲串信号的处理

一、匹配滤波器特性

$$u^*(f) = \sqrt{\frac{T}{N}} \sin c(fT) N \sin c(NfT_r) e^{j\pi f[(N-1)T_r + T]}$$

$$H(f) = \mu^*(f) e^{-j2\pi f t_0}$$

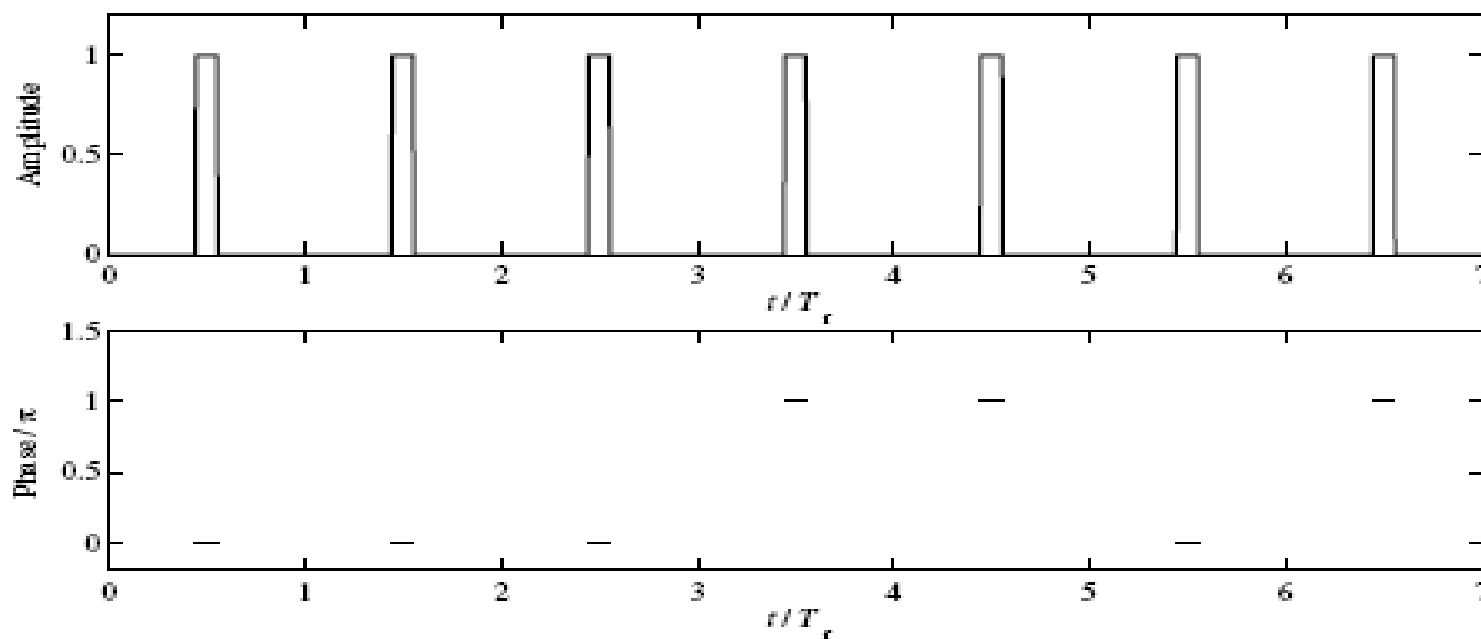
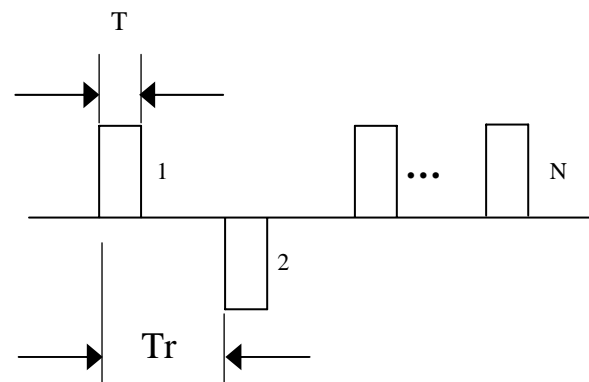
$$= \mu_1^*(f) \cdot \mu_2(f) \cdot e^{-j2\pi f t_0} = \mu_1^*(f) \cdot \mu_2'(f)$$

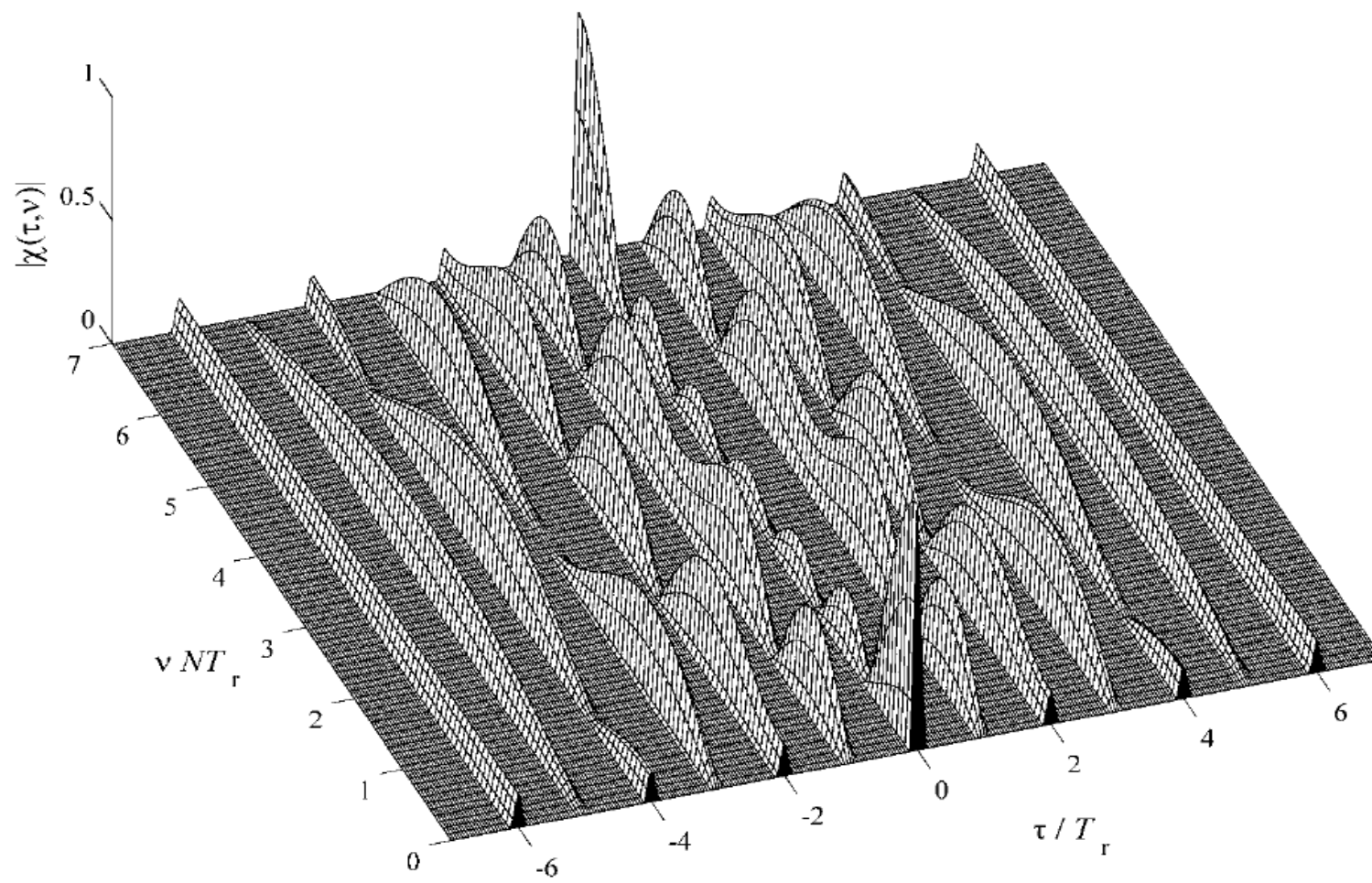
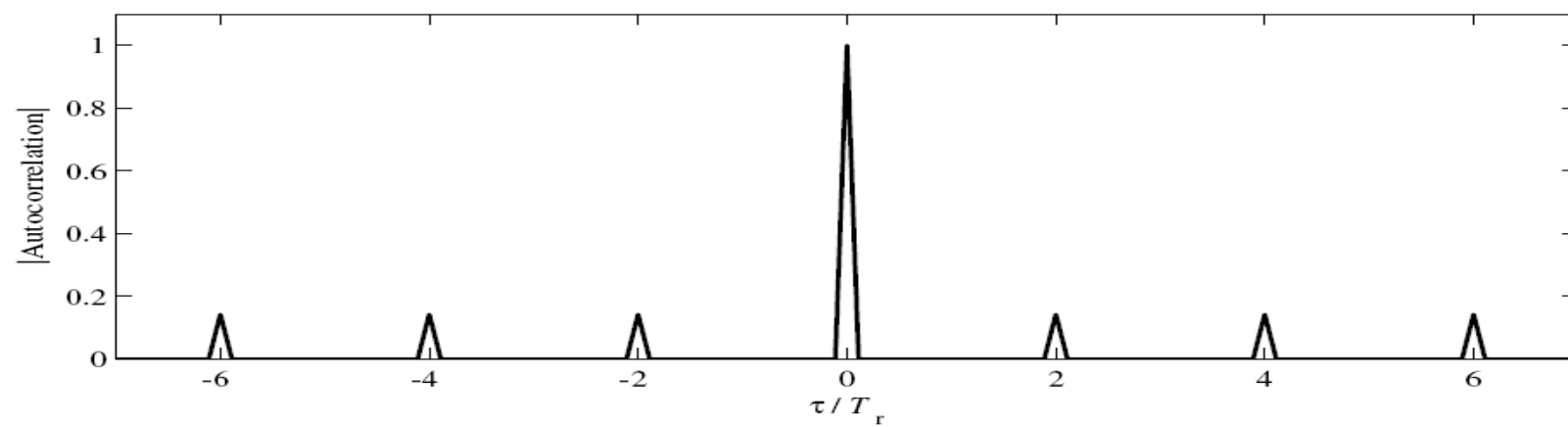
$$\mu_1^*(f) = \sqrt{\frac{T}{N}} \sin c(fT) e^{j\pi f T} \quad \mu_2'(f) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2\pi f n T_r}$$

7.6 其它脉冲串信号

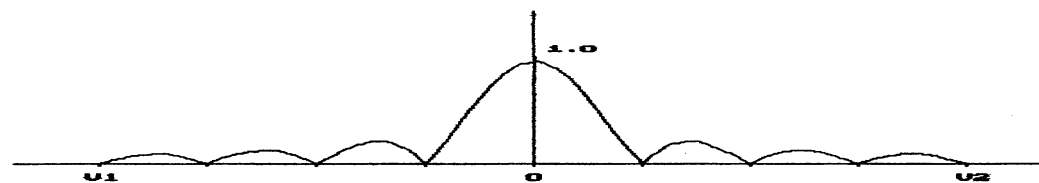
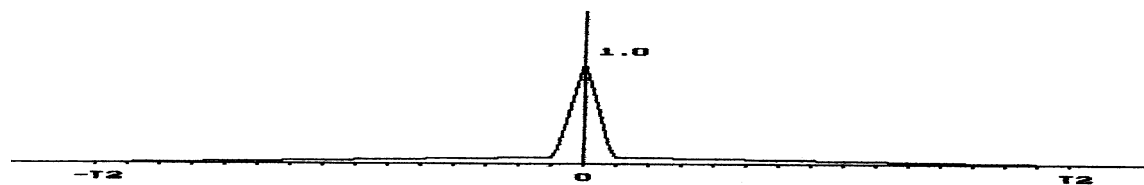
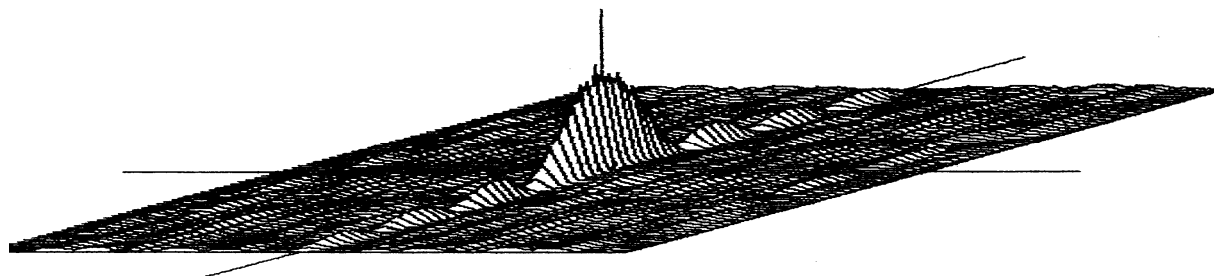
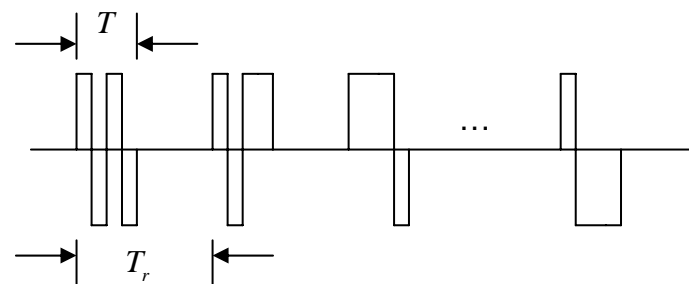
一、脉间编码脉冲串信号

$$\mu(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} c_i \mu_1(t - iT_r)$$





二、二相编码脉冲串信号 (PN截断码集)



三、频率步进脉冲串信号

1、无调制

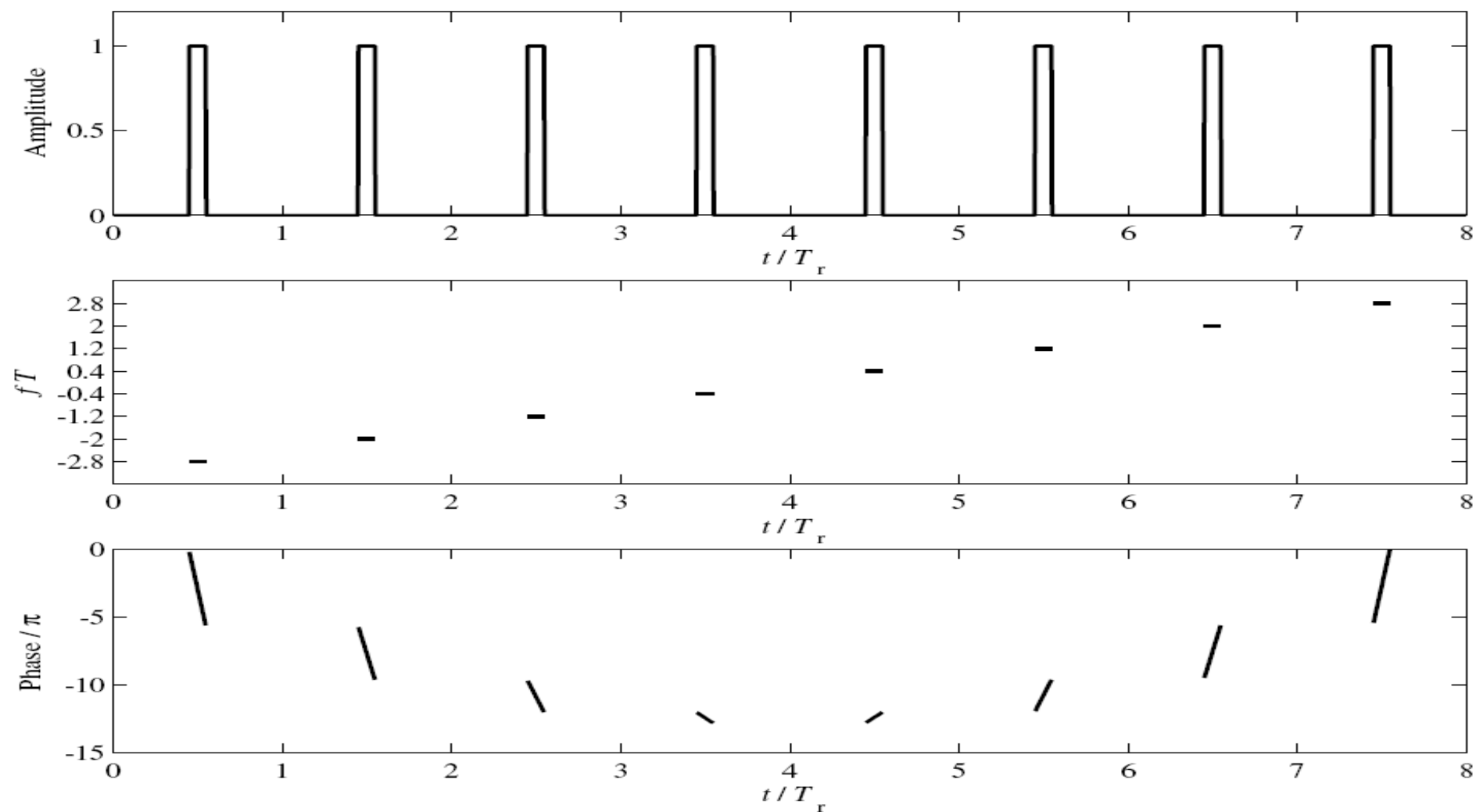


FIGURE 9.5 Characteristics of stepped-frequency pulse train with $T \Delta f = 0.8$, $N = 8$, $T_r/T = 10$.

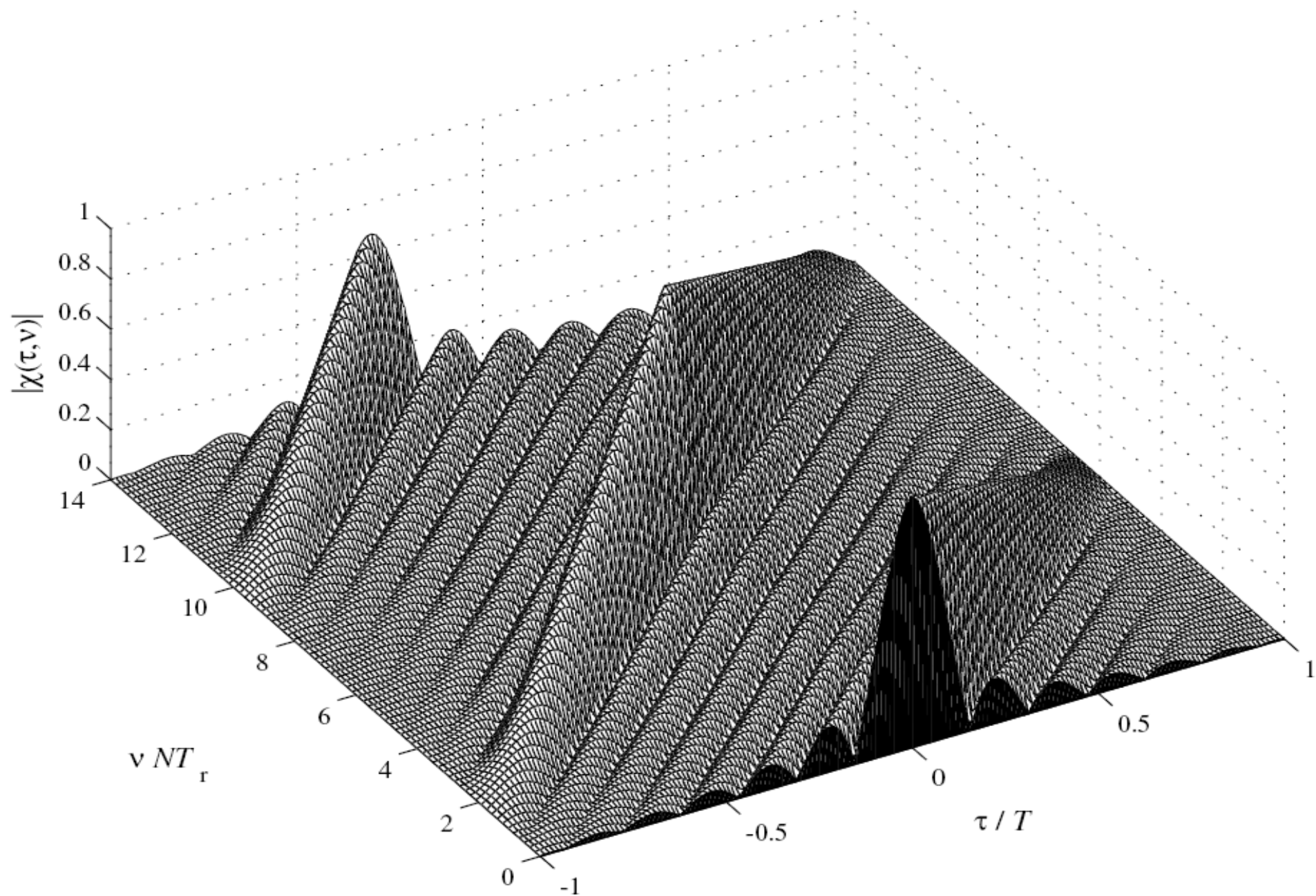


FIGURE 9.6 Ambiguity function of stepped-frequency pulse train with $T\Delta f = 0.8$, $N = 8$, $T_r/T = 10$.

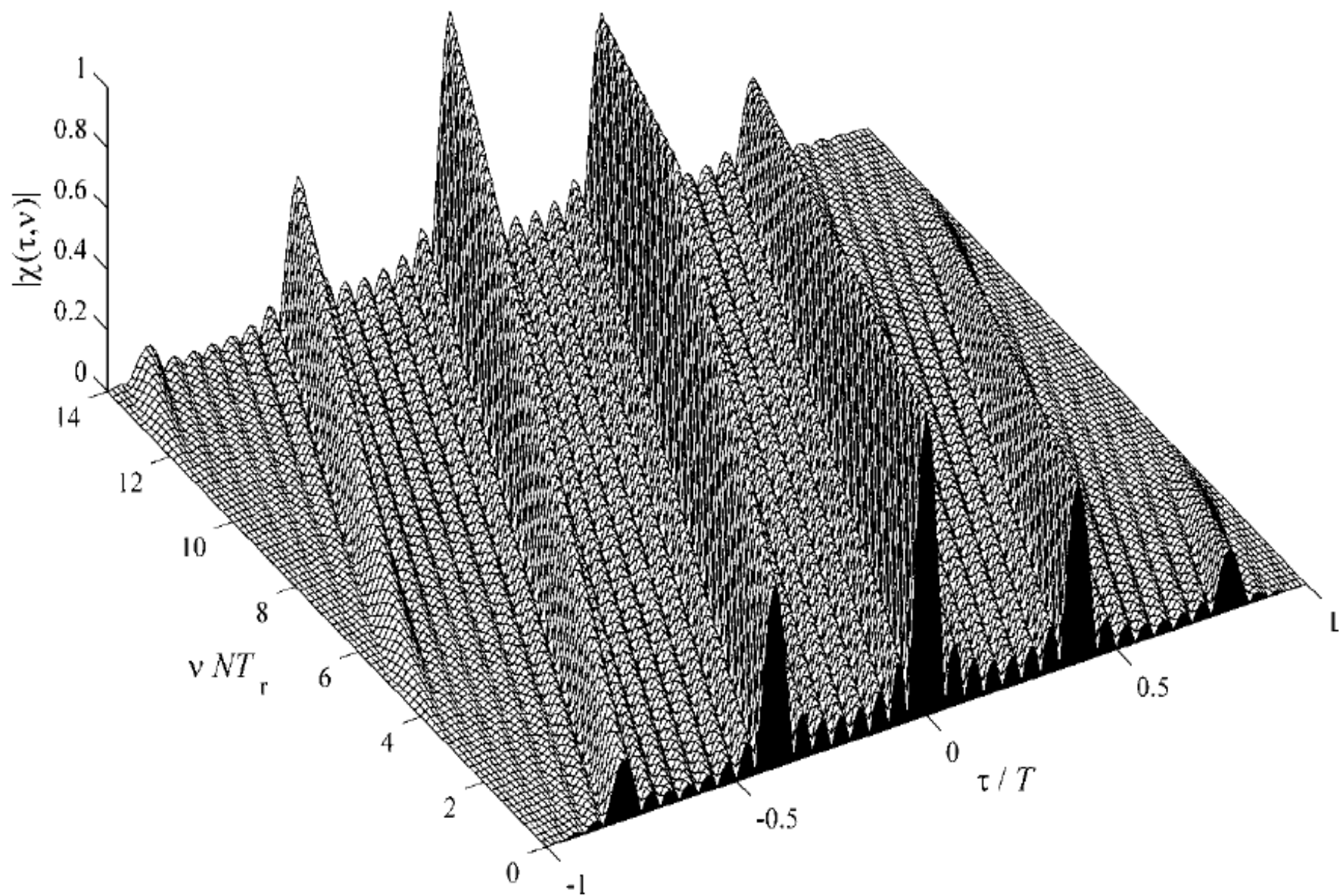


FIGURE 9.7 Ambiguity function of stepped-frequency pulse train with $T\Delta f = 2.5$, $N = 8$, $T_r/T = 10$.

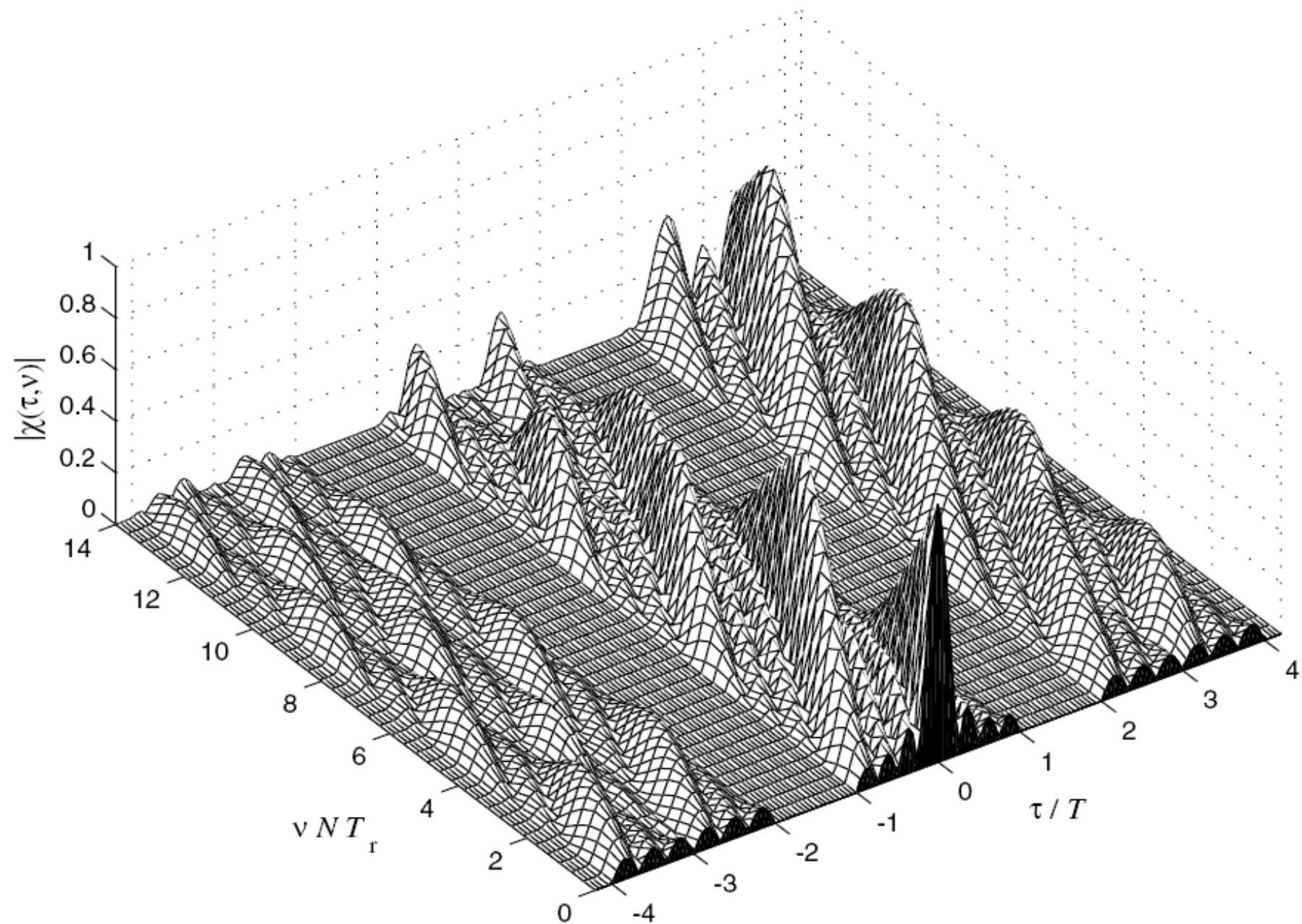


FIGURE 9.8 Mainlobe and first recurrent lobes of the AF of stepped-frequency pulse train. $T\Delta f = 1$, $N = 4$, $T_r/T = 3$.

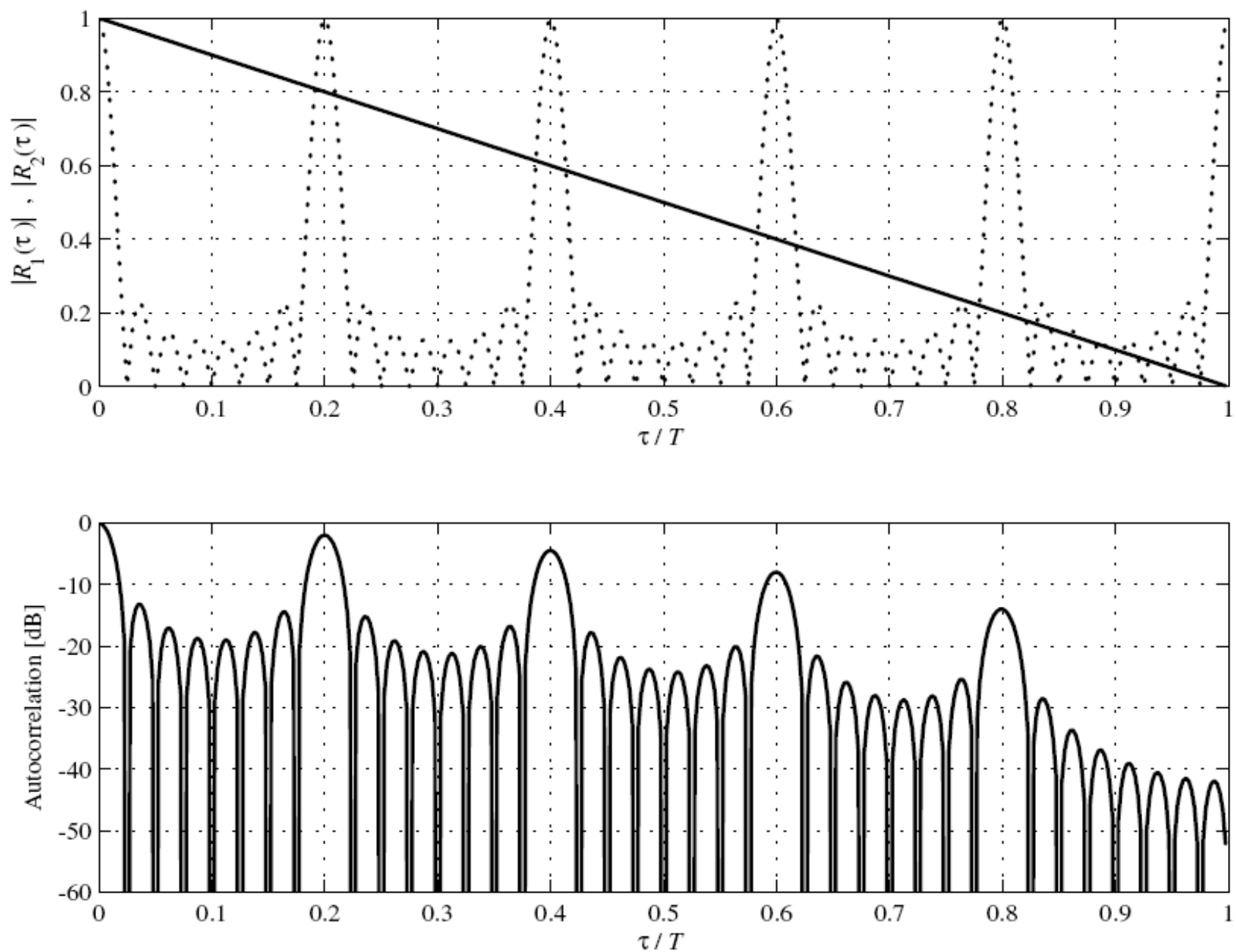
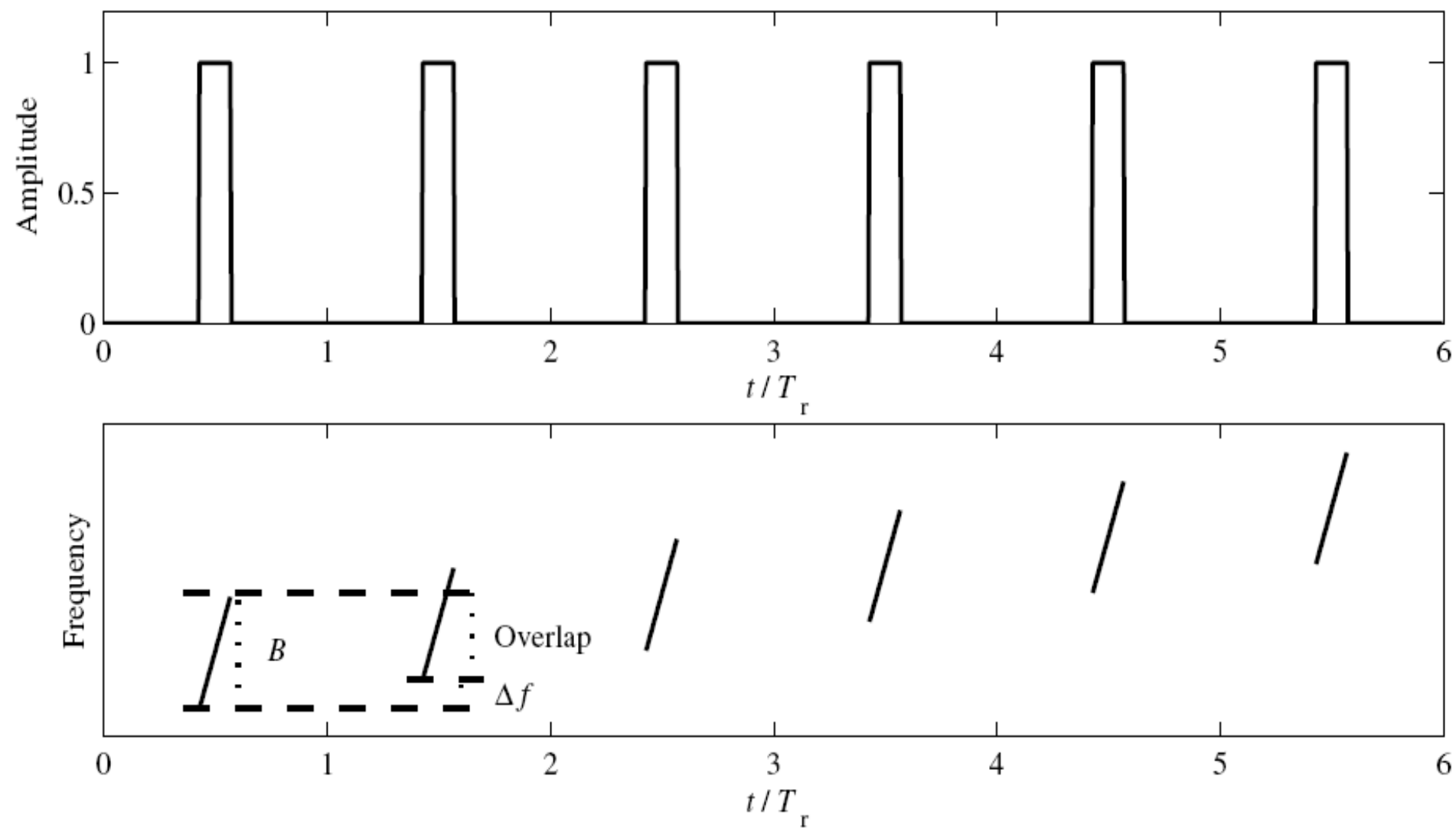


FIGURE 9.21 Stepped-frequency train of fixed-frequency pulses. Top: $|R_1(\tau)|$ (solid) and $|R_2(\tau)|$ (dotted); bottom: partial ACF (in dB). $N = 8$, $T\Delta f = 5$, $TB = 0$.

2、LFM



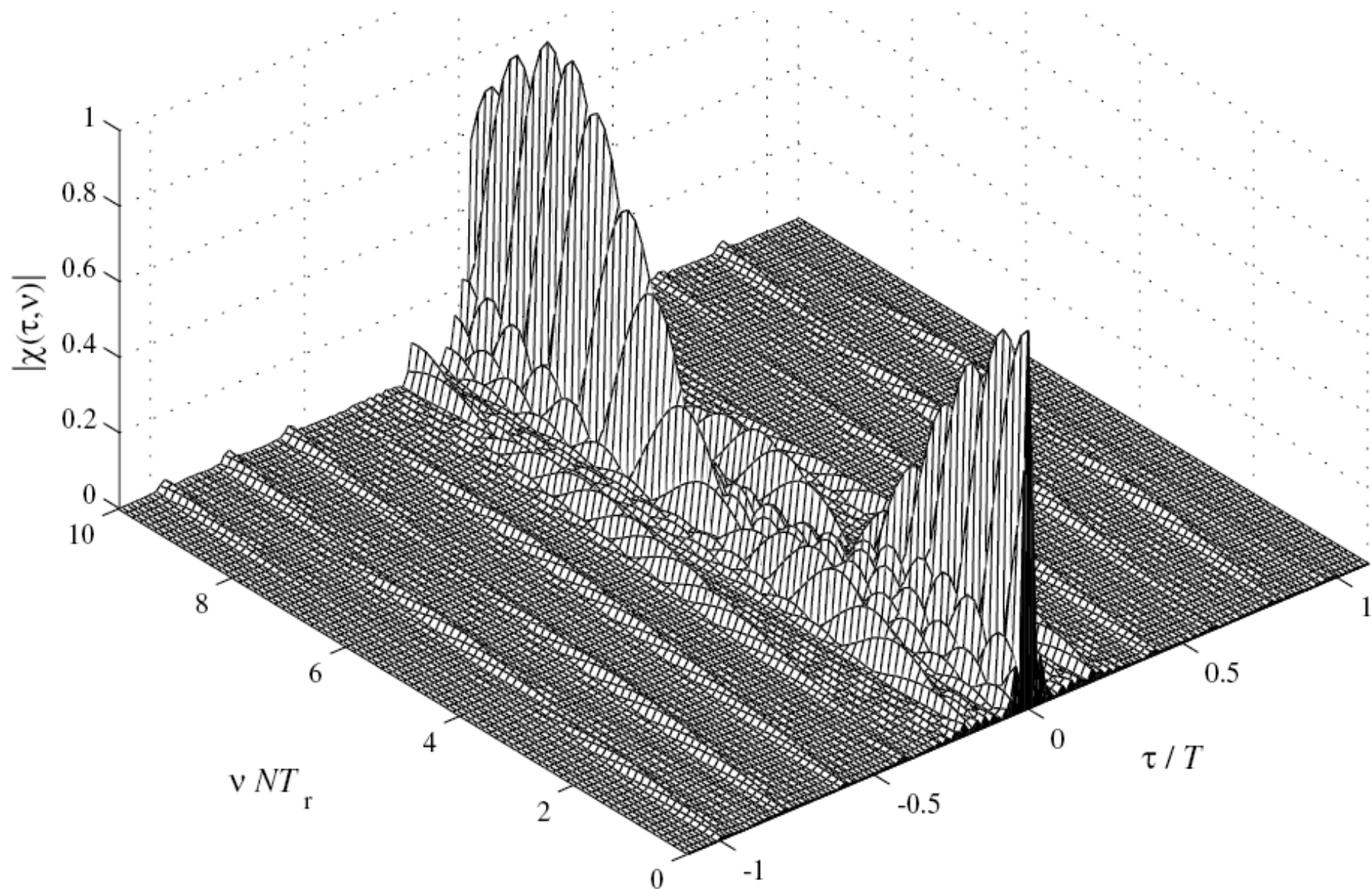


FIGURE 9.22 Ambiguity function of stepped-frequency train of LFM pulses with grating lobe cancellation. Delay axis limited to $|\tau| \leq T$. $N = 8$, $T\Delta f = 5$, $TB = 12.5$, $T/T_r = \frac{1}{10}$.

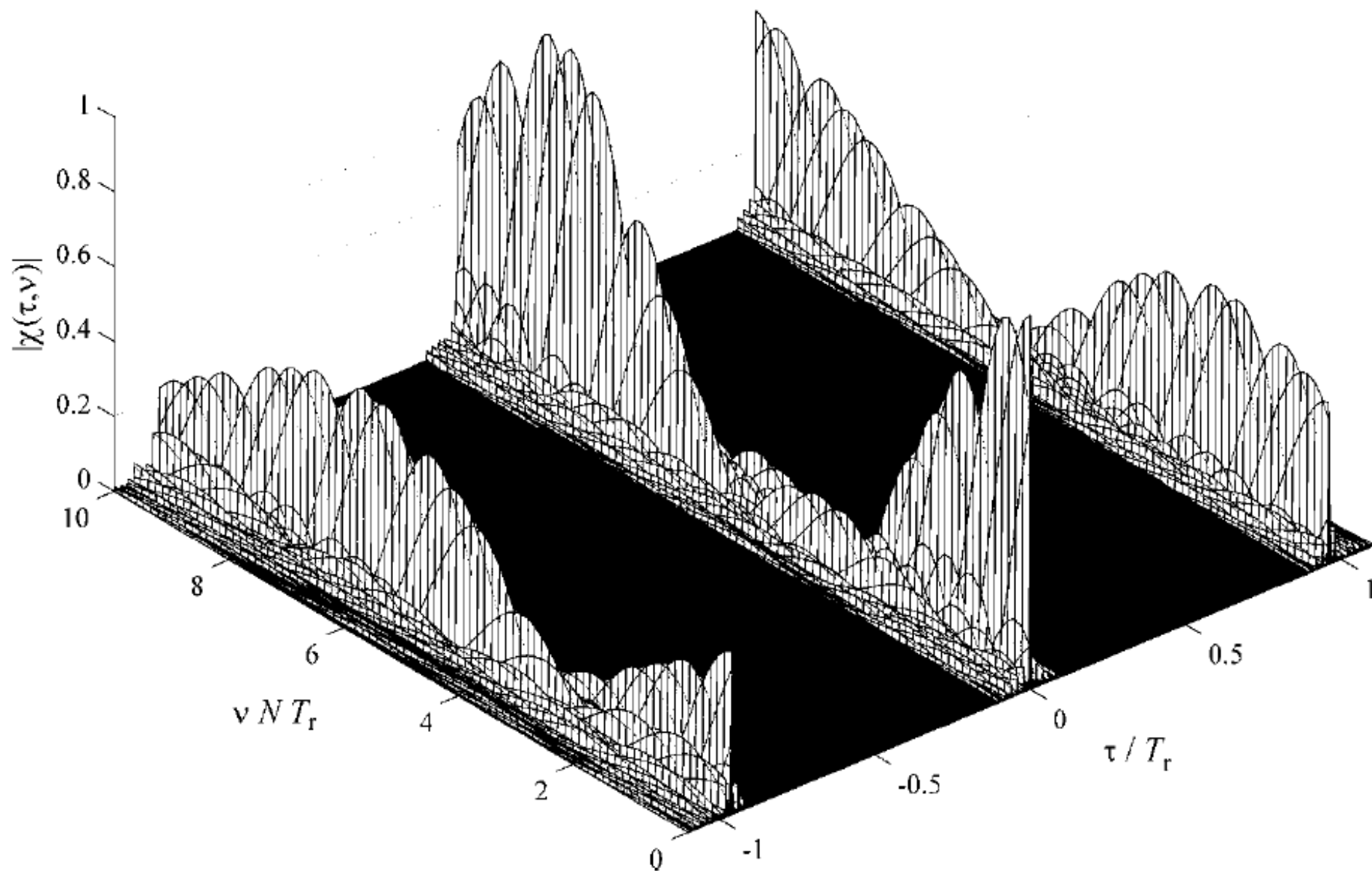


FIGURE 9.23 Ambiguity function of stepped-frequency train of LFM pulses with grating lobe cancellation. Delay axis extended to include the nearest recurrent lobes. $N = 8$, $T \Delta f = 5$, $TB = 12.5$, $T/T_r = \frac{1}{10}$.

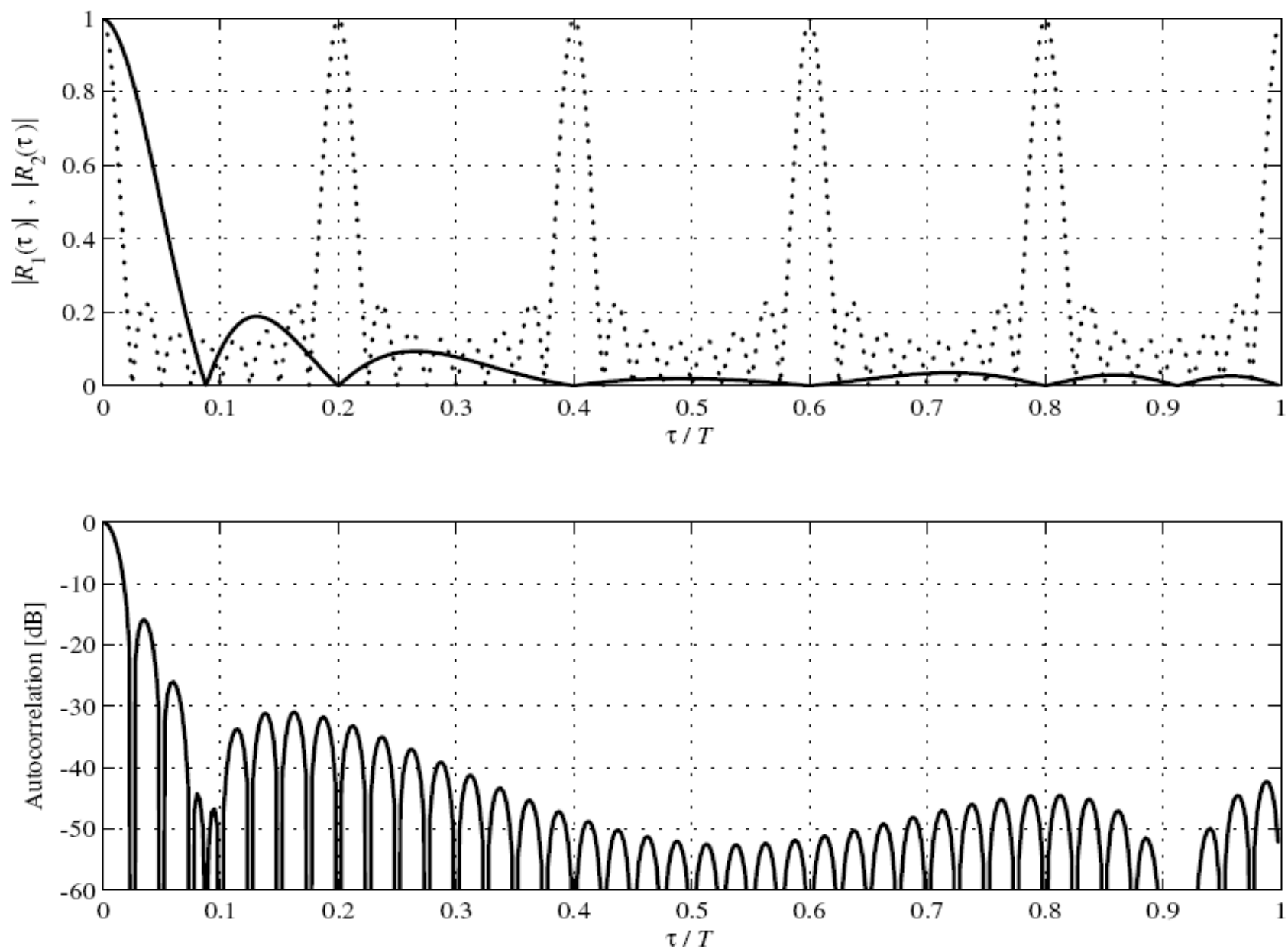


FIGURE 9.20 Stepped-frequency train of LFM pulses with grating lobe cancellation. Top: $|R_1(\tau)|$ (solid) and $|R_2(\tau)|$ (dotted); bottom: partial ACF (in dB). $N = 8$, $T\Delta f = 5$, $TB = 12.5$.