数字信号处理

周治国

2023.9

第三章
离散傅里叶变换

§ 3-6 频域采样

问题：
采用DFT实现了频域取样，对于任意一个频率特性能否用频率取样的方法去逼近？

研究：
1，限制？
2，经过频率取样后有什么误差？
3，如何消除误差？
4，取样后所获得的频率特性怎样？

§ 3-6 频域采样

一、取样点数的限制

$\forall x(n)$，任一非周期序列（绝对可和）

$$X(z) \to X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n) e^{-j\omega n}$$

$$X(k) \overset{\triangle}{=} X(e^{j\omega})\Big|_{\omega=\frac{2\pi}{N}k, k=0,1,\cdots,N-1}$$

注意：$X(k) \neq DFT[x(n)]$ 为什么？

问题：$X(k), 0 \le k \le N-1 \xrightarrow{?} x(n)$

频率取样后，信息有没有损失？能否用序列频率特性取样值X(k)恢复出原序列x(n)？

∵频域取样→时域周期化

∴若 $x(n)$ 为无限长序列，则不可能由 $X(k) \to x(n)$

问题：
若有$x(n), n = 0,1,\ldots, \quad M-1$

如何选取**N**才能使

$$X(k) \quad \to \quad x(n)$$

$$0 \le k \le N-1 \qquad 0 \le n \le M-1$$

§ 3-6 频域采样

令 $\widetilde{X}(k) \triangleq X((k))_N \longleftrightarrow \widetilde{x}'(n) = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}\widetilde{X}(k)W_N^{-kn} \quad \forall n$

$$= \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}X(k)W_N^{-kn}$$

$$= \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}\left[\sum_{m=0}^{M-1}x(m)W_N^{km}\right]W_N^{-kn}$$

$$= \sum_{m=0}^{M-1} x(m)\,\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} W_N^{(m-n)k}$$

$$= \sum_{m=0}^{M-1}x(m)\delta\big((n+lN)-m\big) \quad \forall l,n$$

$$= \sum_{l=-\infty}^{+\infty}x(n+lN) \rightarrow x(n) \text{ 的周期延拓}$$

$$\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}W_N^{(m-n)k} = \begin{cases} 1, & m = n + lN \\ 0, & \text{其他} \end{cases} = \delta\big((n+lN)-m\big)$$

§ 3-6 频域采样

∴只有当 $N \ge M$ 时（否则 $\Delta\omega = \dfrac{2\pi}{N}$ 太大，导致混叠），

$$\tilde{x}'(n) \to \tilde{x}'(n) R_N(n) \to x(n), \quad 0 \le n \le M-1$$

既然

$$X(k) \quad \to \quad x(n)$$

$$0 \le k \le N-1 \qquad 0 \le n \le N-1$$

$$\downarrow$$

$$\forall z, \ X(z) = ?$$

N点有限长序列x(n)，可从单位圆X(z)的N个取样值X(k)恢复，因而这N个X(k)也应该能完全表达整个X(z)函数及频响$X(e^{jw})$。DFT的综合就是z变换。

§ 3-6 频域采样

二、内插公式

$$X(z)=\sum_{n=0}^{N-1}x(n)z^{-n}=\sum_{n=0}^{N-1}\left[\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}X(k)W_N^{-kn}\right]z^{-n}$$

$$=\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}X(k)\sum_{n=0}^{N-1}\left(W_N^{-k}z^{-1}\right)^n$$

$$=\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}X(k)\frac{1-\boxed{W_N^{-kN}}z^{-N}}{1-W_N^{-k}z^{-1}}$$

$=1$

$X(z)$的内插公式

$$=\frac{1-z^{-N}}{N}\sum_{k=0}^{N-1}\frac{X(k)}{1-W_N^{-k}z^{-1}} \qquad (3\text{-}101)$$

$$=\sum_{k=0}^{N-1}X(k)\phi_k(z) \qquad (3\text{-}102)$$

式中：

$$\phi_k(z)=\frac{1}{N}\frac{1-z^{-N}}{1-W_N^{-k}z^{-1}}$$

（内插函数）

在已知X(k)时，可根据内插公式求得任意z点的X(z)值，因此X(z)的N个取样点的X(k)值，包含了z变换的全部信息。

§ 3-6 频域采样

类似的，有：$X(e^{j\omega}) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k)\phi_k(z)\Big|_{z=e^{j\omega}}$

$$= \sum_{k=0}^{N-1} X(k)\phi_k(e^{j\omega})$$

$$= \sum_{k=0}^{N-1} X(k)\phi(\omega - \frac{2\pi}{N}k)$$

式中：

$$\phi(\omega) = \frac{1}{N}\frac{\sin\left(\frac{\omega N}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\omega}{2}\right)} e^{-j\omega\left(\frac{N-1}{2}\right)}$$

比较：时域取样定理
　　　频域取样公式

§3-7 用DFT对连续时间信号逼近的问题

若信号持续时间为有限长，则其频谱无限宽；
若信号的频谱为有限宽，则其持续时间无限长。
严格来说，持续时间有限的带限信号是不存在的。

为满足DFT的变换条件，实际上对频谱很宽的信号，为防止时域取样后产生频谱混叠失真，可用前置滤波器滤除幅度较小的高频分量，使连续时间信号的带宽小于折叠频率。

对于持续时间很长的信号，取样点数太多以致无法存储和计算，只好截取为有限长进行DFT。

所以，用DFT对连续时间信号进行傅里叶分析必然是近似的，近似的准确程度严格的说是被分析波形的一个函数。

两个变换之间的差异是因为DFT需要对连续时间信号取样和截断为有限列长而产生。

思考1:

课本P100上说："信号的持续时间为有限长，则其频谱无限宽；若信号的频谱为有限宽，则其持续时间无限长。"

人唱一首歌，持续时间有限长，是否频谱无限宽？感觉好像应该有限宽。试解释这一现象。

数字信号处理系统的典型框图

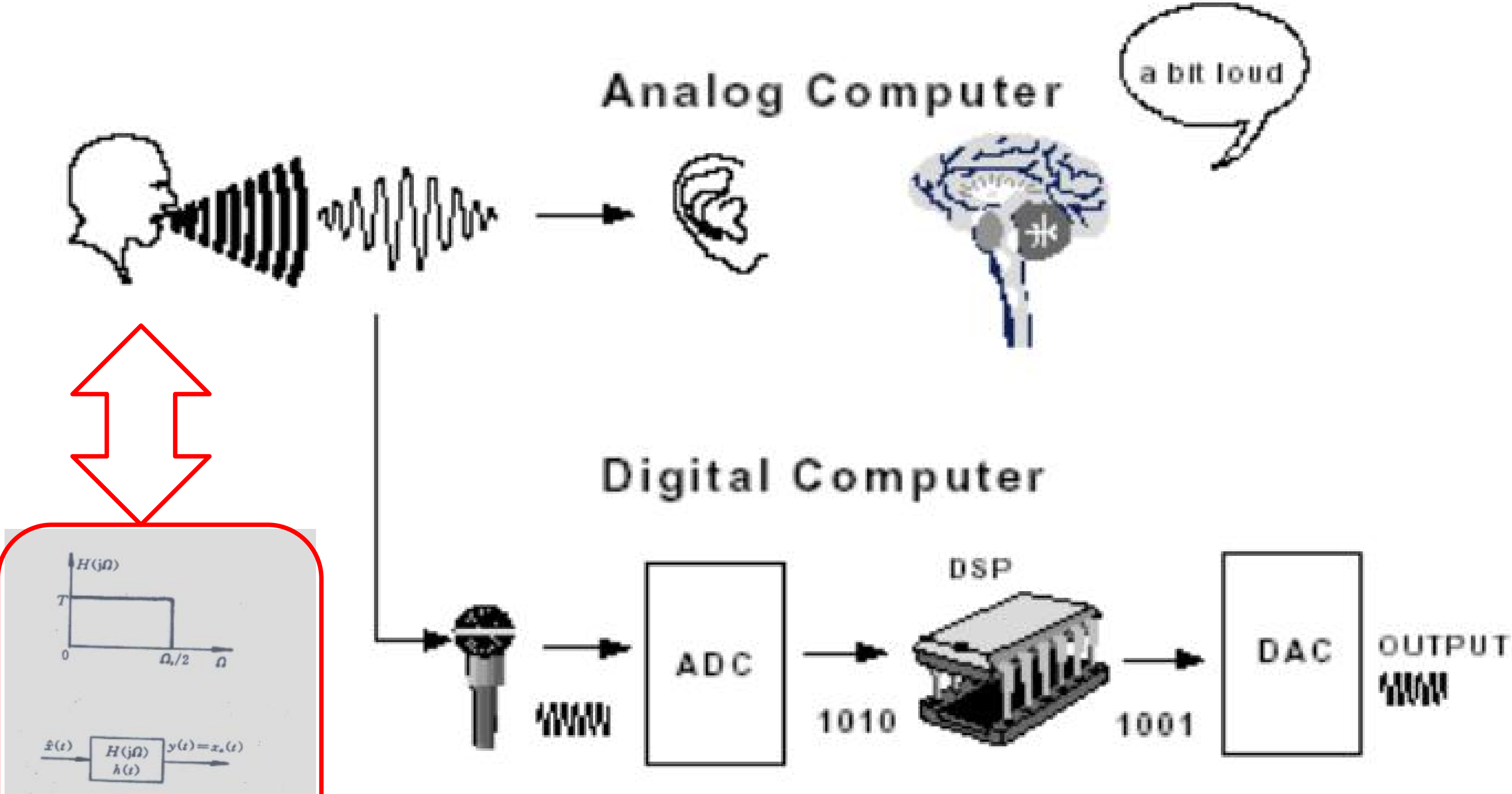


图 2—7 取样信号的恢复

解释：人的喉咙相当于低通滤波器。歌曲的频谱在人头脑中“酝酿”的时候“持续时间为有限长，其频谱无限宽”；但经过人喉咙唱出来的时候“其频谱为有限宽，且其持续时间无限长”。

§3-7 用DFT对连续时间信号逼近的问题

$$x_a(t) \xrightarrow{\text{抽样}} x_a(nT) \xrightarrow{\text{截取}} x(n) \xrightarrow{\text{DFT}} X(k) \quad X_a(e^{j\omega})\Big|_{\omega=\frac{2\pi}{N}k}$$

$$x_a(t) \updownarrow \qquad x(n) \ \overset{\text{DTFT}}{\updownarrow} \qquad X(k) \ \| $$

$$X_a(e^{j\omega}) \approx X(e^{j\omega}) \text{ —— } X(e^{j\omega})\Big|_{\omega=\frac{2\pi}{N}k}$$

P118
清华

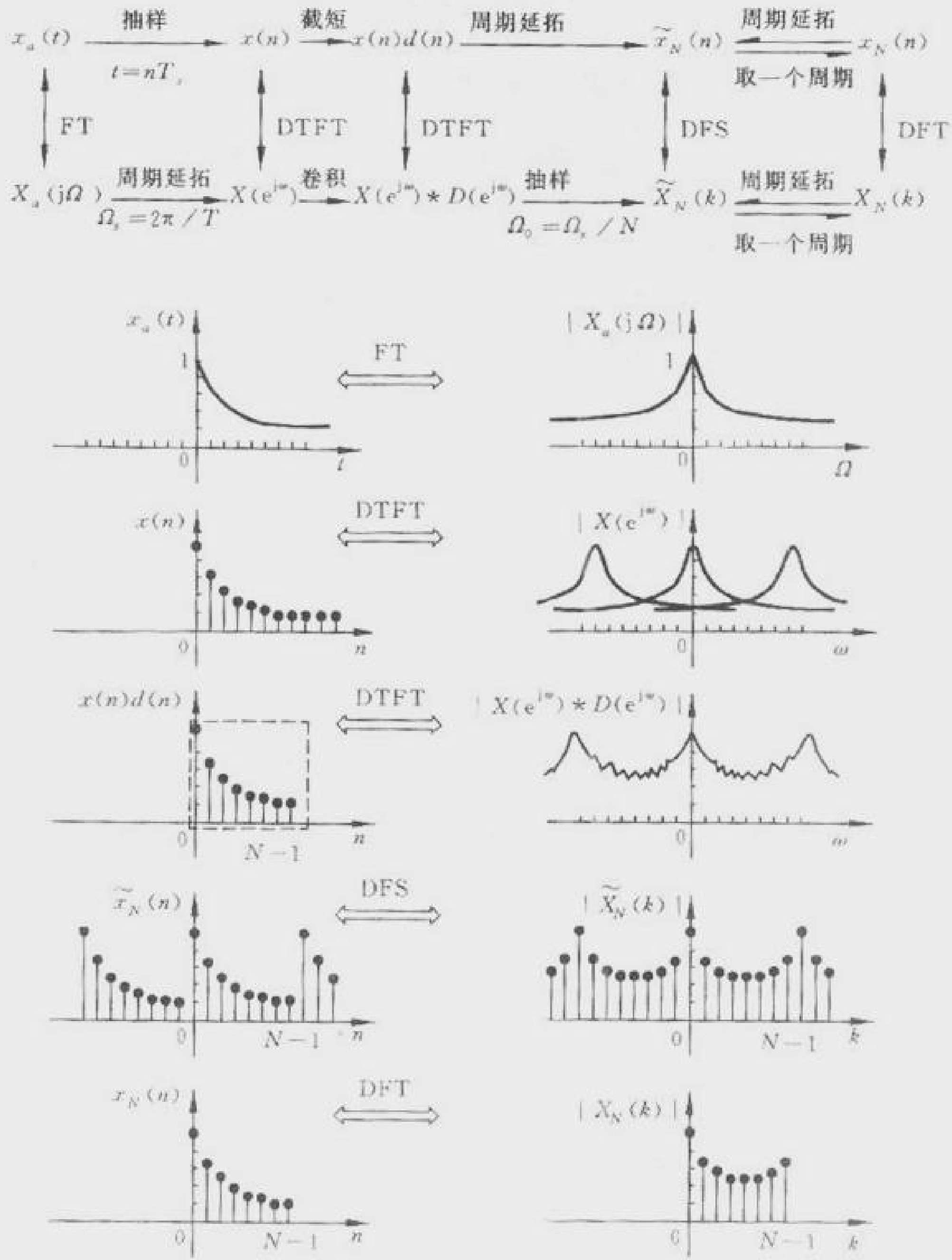


图 3-15 利用 DFT 对 CTFT（连续时间傅里叶变换）逼近的全过程

§3-7 用DFT对连续时间信号逼近的问题

一、混叠现象

消除办法：

$$f_s \ge 2f_h$$

取样频率　信号最高频率

$$T \le \frac{1}{2f_h}$$

取样周期

$$F = \frac{1}{NT} = \frac{f_s}{N}$$

频率分量间的增量（频率分辨率）

$$t_p = \frac{1}{F} = NT$$

最小记录长度

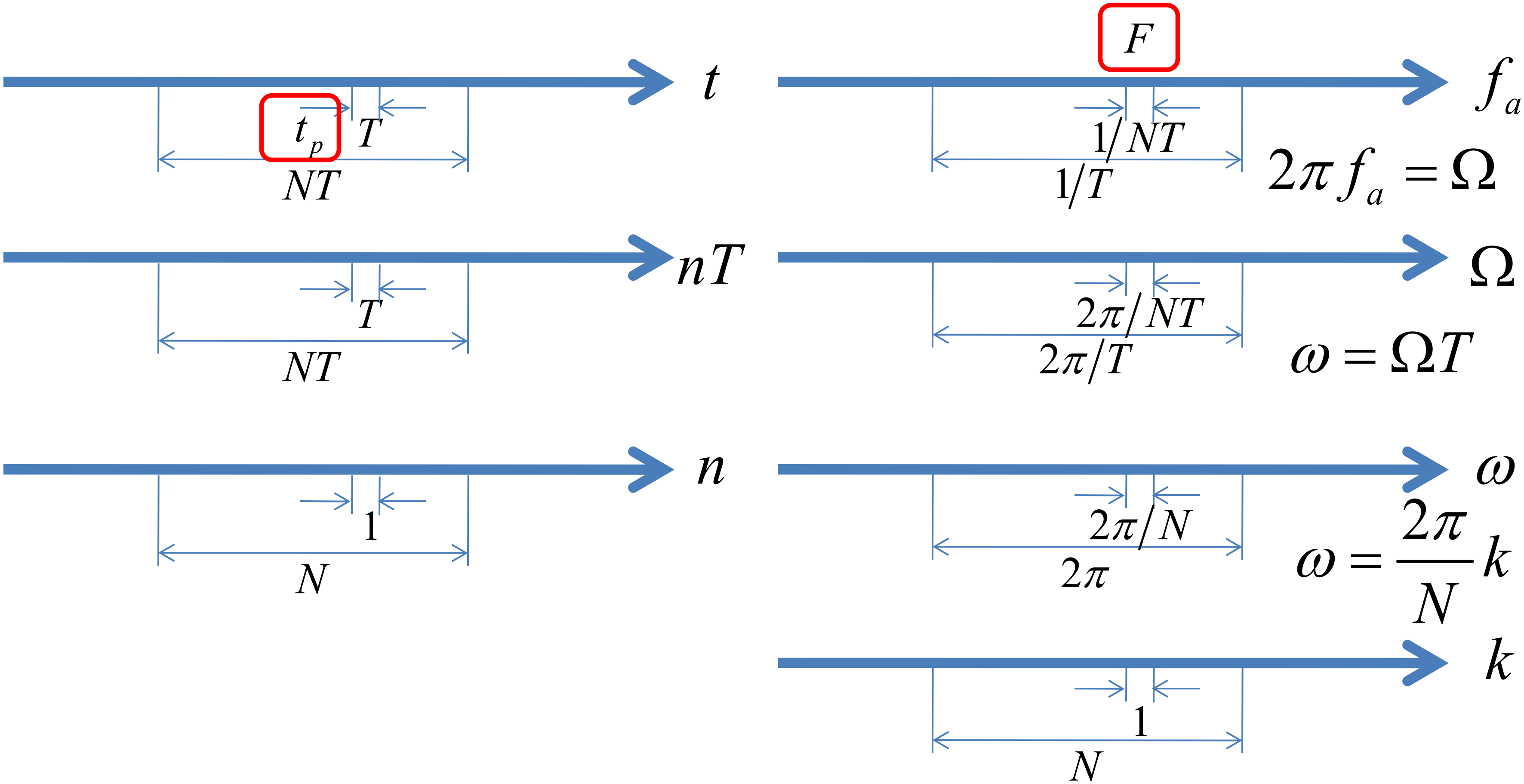
实际中通常：

$$f_s = (3 \sim 4) f_h$$

$$\Rightarrow N \ge \frac{2f_h}{F}$$

P71：在自变量为t和f的情况下，在一个域中对函数进行取样，必是另一个域中函数的周期。

关键字：模拟域谱间距；数字域谱间距



§ 3-7 用DFT对连续时间信号逼近的问题

$\forall F$ —— 频率分辨率

∵DFT的 $F=\dfrac{1}{NT}=\dfrac{f_s}{N}$

$$\left(\because \Delta\omega=\frac{2\pi}{N}\to\Delta f=\frac{1}{N},\ \Delta\Omega=\frac{\Delta\omega}{T},\ \Delta f_a=\frac{\Delta\Omega}{2\pi}=\frac{1}{NT}\right)$$

数字域　　　　模拟域

$f_s\ge 2f_h$ 或 $T\le\dfrac{1}{2f_h}$

$$\therefore N\ge\frac{2f_h}{F}\quad\left(\because N=\frac{f_s}{F}\right)$$

注意：

$$\forall t_p=NT\Longrightarrow F=\frac{1}{NT}=\frac{1}{t_p}\ \text{不变}$$

$$\downarrow$$

$$N\uparrow\longrightarrow T\downarrow\longrightarrow f_s\uparrow\longrightarrow\frac{f_s}{N}$$

§ 3-7 用DFT对连续时间信号逼近的问题

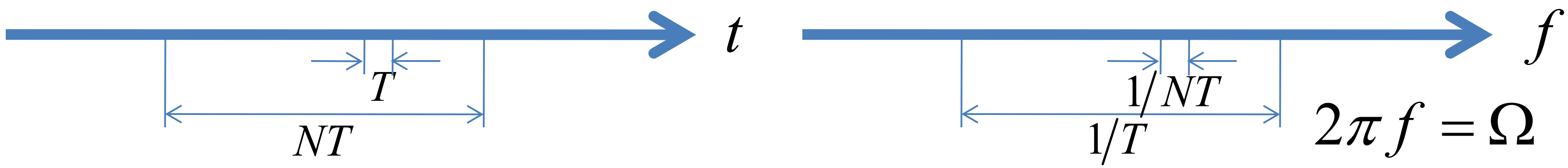
例：P101

例题：习题集P47-13

频谱分析的模拟信号以8kHz被抽样，计算了512个抽样的DFT，试确定频谱抽样之间的频率间隔。

解：

由下图



$2\pi f = \Omega$

$$\text{频域抽样间隔} f_0 = \frac{1}{NT} = \frac{8k}{512} = 15.6Hz$$

思考2:

课本P101上说：“信号的频率分辨率F和最小记录长度t_p成反比”。

$$F=1/t_p \qquad (3\text{-}110)$$

有同学问：如果示波器采样时间持续1s，以100Ms/s(每秒采样100M次)的采样速率对信号采样，最小记录长度t_p=1s，根据公式（3-110），那么无论怎么设置采样率，频率分辨率都是1Hz。若需要对信号进行实时高精度测频，如何实现。

解释：示波器内部往往每一通道有一定深度的存储FIFO，即示波器可以以100Ms/s 持续采集FIFO空间深度的数据。也即N是常数。

$$t_p = 1/F = N/f_s$$

提高采样率fs， t_p增加， F减小。

若需要对信号进行高精度测频，分辨率0.01Hz，信号最高频率100Hz，根据采样定理，先选择合适采样率，如400Hz/s，根据上述公式，N>10k， $t_p = 100s$。

如何实时处理，这是个难题。我们的经验，可以先预估信号频点，采用DFT，在信号频点附近计算若干点的DFT。

§3-7 用DFT对连续时间信号逼近的问题

二、栅栏效应

$$X(k) \approx X_a(e^{j\omega})\Big|_{\omega=\frac{2\pi}{N}k,0\le k\le N-1}$$

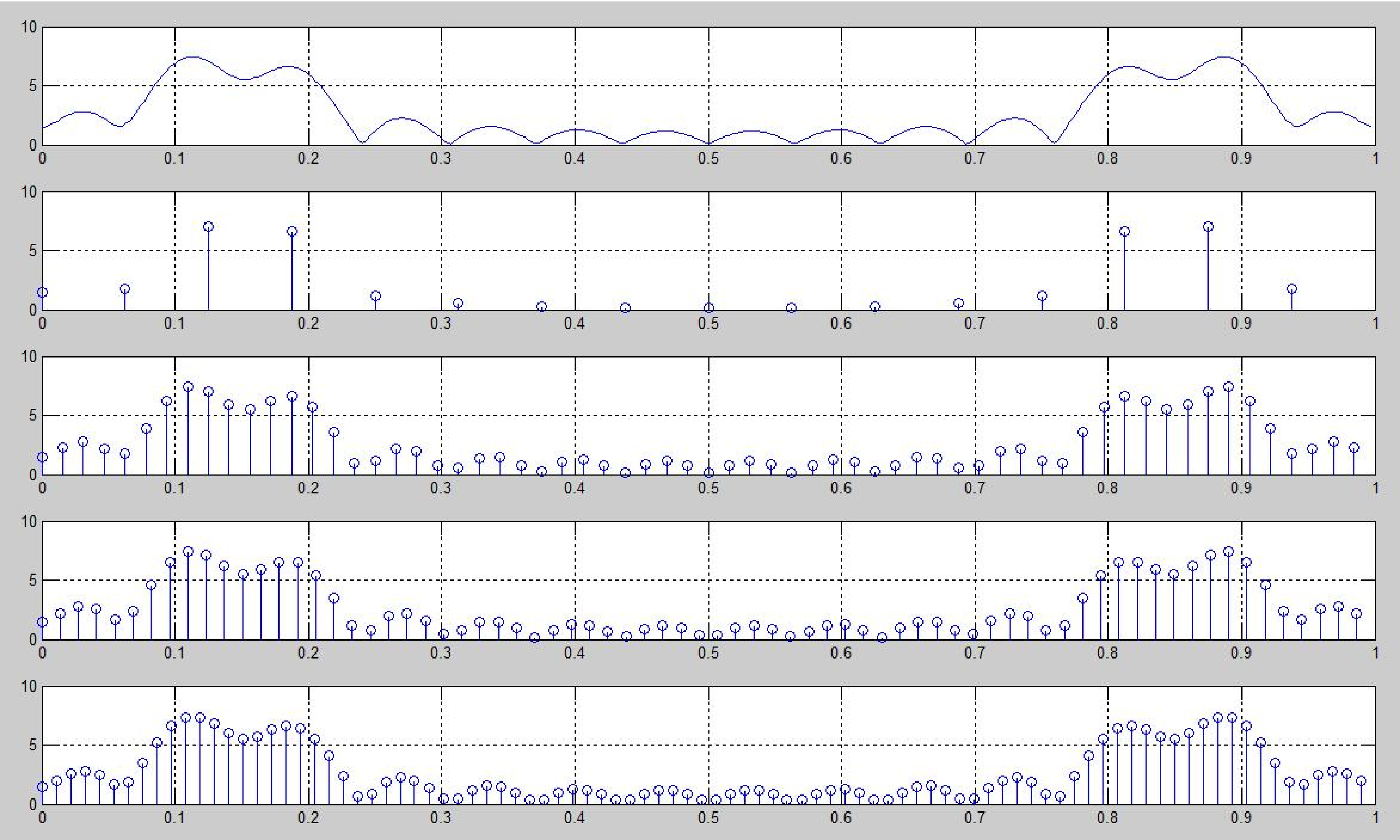
办法：对 $x(n)$ 通过补零加长。

注意：补零不能提高分辨力！

延长序列的DFT (不是2的整数次幂)

序列x=sin(0.25*pi*n)+ sin(0.35*pi*n)； n=0:15；

补零到64点，73点，93点，作DFT运算

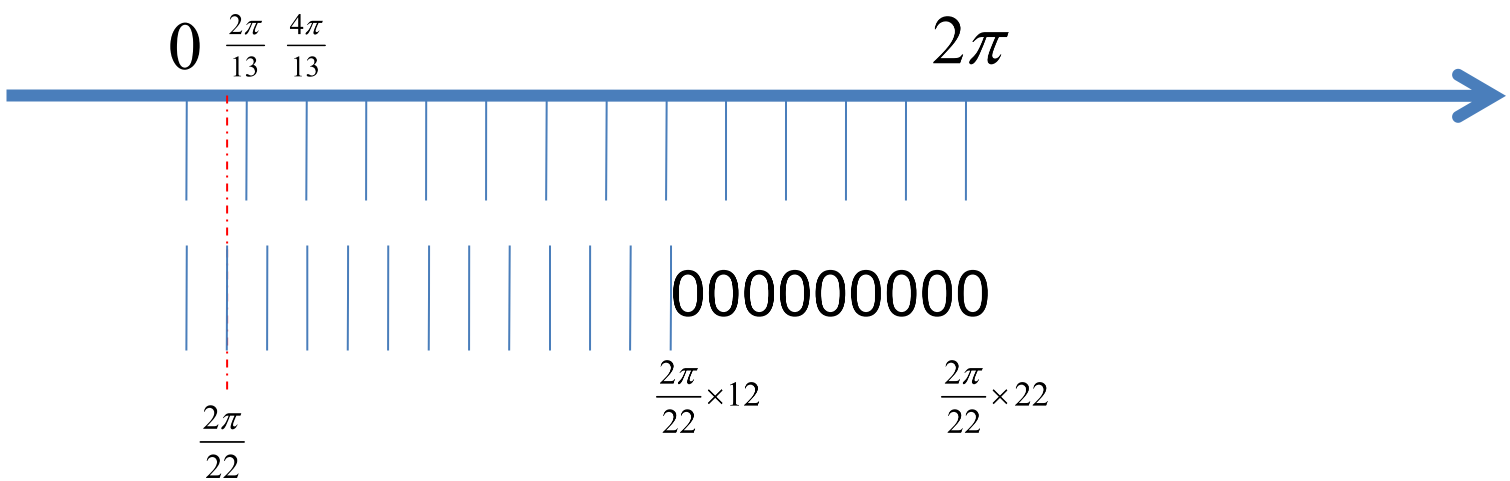


历年考试真题

设有限长序列$x(n), 0 \le n \le 12$, 令$X(e^{j\omega})$表示$x(n)$的离散时间傅里叶变换$DTFT$，如果希望通过计算一个M点DFT来求出$\omega = \pi / 11$处$X(e^{j\omega})$的值，试确定最小可能的正整数M，并给出一种利用M点DFT求出$\omega = \pi / 11$处$X(e^{j\omega})$的值的方法。

历年考试真题

设有限长序列$x(n), 0 \le n \le 12$，令$X(e^{j\omega})$表示$x(n)$的离散时间傅里叶变换$DTFT$，如果希望通过计算一个M点DFT来求出$\omega = \pi / 11$处$X(e^{j\omega})$的值，试确定最小可能的正整数M，并给出一种利用M点DFT求出$\omega = \pi / 11$处$X(e^{j\omega})$的值的方法。



$$0 < \omega = \frac{2\pi}{22} < \frac{2\pi}{13}$$

§ 3-7 用DFT对连续时间信号逼近的问题

三、频谱泄露现象

$$x_a(nT) \to x(n), 0 \le n \le N-1$$

$$\downarrow$$

$$x_a(nT)R_N(n) \xleftrightarrow{FT} X_a(e^{j\omega}) \widetilde{\otimes} R_N(e^{j\omega})$$

$$\downarrow \textbf{DFT} \qquad\qquad \omega = \frac{2\pi}{N}k$$

$$X(k) = X_a(k) \otimes R_N(k)$$

$\because R_N(k)$并非δ（k)

$\therefore X_a(k)$ 中的的频谱被展宽→泄漏

解决办法：选择谱特性更接近$\delta(k)$ 的窗函数

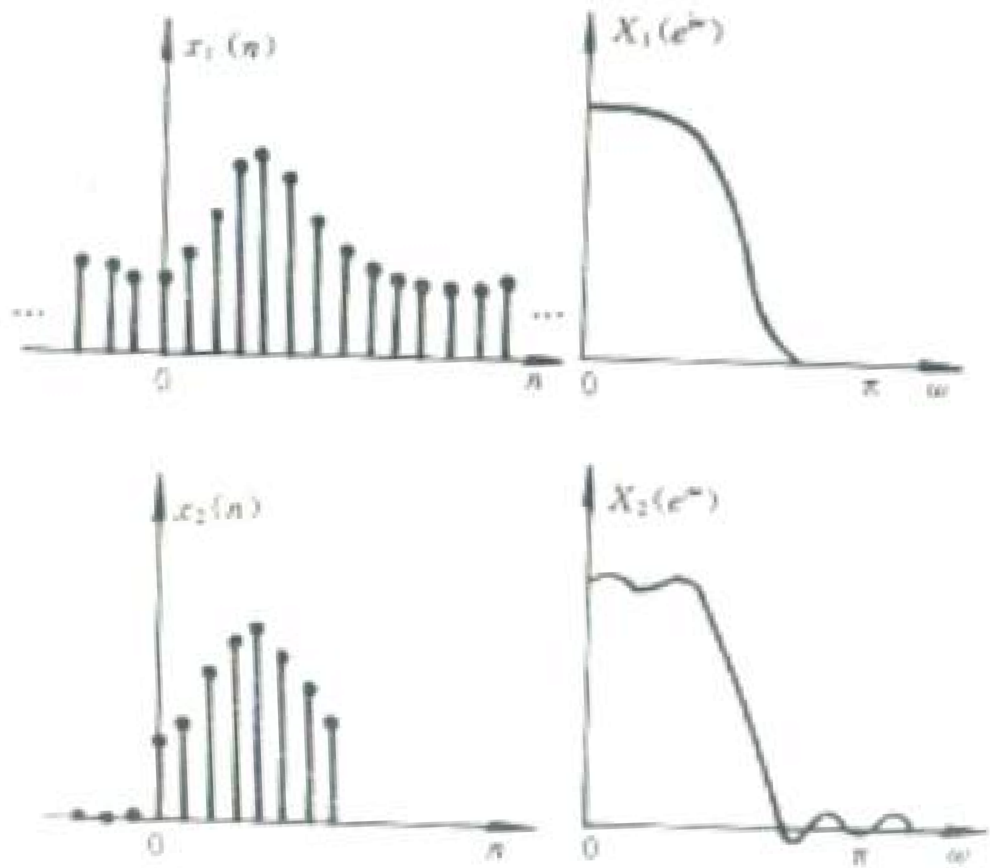


图 3－23　信号截断时产生的频谱泄漏现象

对模拟信号$x(t) = \cos(400\pi t)$以一定的采样率进行采样，得到一个256点数字序列$x(n)$，其中$n = 0 \sim 255$。

(1) 若采样率$F_s = 0.8KHz$，计算序列$x(n)$的256点DFT。该结果能否说明题中所述情形不存在谱泄露现象？为什么？

(2) 若采样率$F_s = 0.4KHz$，重新计算序列$x(n)$的256点DFT，并解释产生该结果的原因。

解：

$$(1)\, x(t) = \cos\left(400\pi t\right)$$

$$F_s = 0.8KHz$$

$$x(n) = \cos\left(400\pi nT\right) = \cos\left(\frac{400\pi n}{F_s}\right) = \cos\left(\frac{\pi n}{2}\right)$$

$$= \frac{1}{2}\left[e^{j\pi n/2} + e^{-j\pi n/2}\right] = \frac{1}{2}\left[e^{j\frac{2\pi n}{256}64} + e^{j\frac{2\pi n}{256}(256-64)}\right], n = 0 \sim 255$$

$$\mathrm{DFT}\left\{x(n)\right\} = 128\left[\delta(k-64) + \delta(k-192)\right]$$

$$(2)\, x(t) = \cos\left(400\pi t\right)$$

$$F_s = 0.4KHz$$

$$x(n) = \cos\left(400\pi nT\right) = \cos\left(\frac{400\pi n}{F_s}\right) == \cos(\pi n)$$

$$\mathrm{DFT}\left\{x(n)\right\} = 256\delta(k-128)$$

§ 3-8 加权技术与窗函数

一、加权的作用

P105

$x(n) \rightarrow w(n)x(n) \xrightarrow{DFT}$ **抑制频谱泄漏** $\quad 0 \le n \le N-1$

点、线、面

频域
滤波
（频域加权）

时域
加权
（时域滤波）

时域：点相卷
频域：线相乘

时域：点相乘
频域：线相卷

抑制“栅瓣”露头

抑制“主瓣”泄露

处理过程

输入信号

- 限频：前置滤波
- 限时：加窗截断（加权）

数字处理

- 滤波：时域相卷，频域相乘

§ 3-8 加权技术与窗函数

二、常用的窗函数

幅度响应

$$W_{db}(\omega)=20\log_{10}\frac{\left|W\left(e^{j\omega}\right)\right|}{W\left(e^{j0}\right)}$$

$$w(n)\leftrightarrow W\left(e^{j\omega}\right)$$

$$W\left(e^{j0}\right)$$

1.矩形窗

$$\omega(n)=1,$$

$$n=-\frac{N}{2},\ldots,-1,0,1,\ldots\frac{N}{2}$$

$$W\left(e^{j\omega}\right)=\frac{\sin\frac{N\omega}{2}}{\sin\frac{\omega}{2}}$$

$$\omega(n)=1,$$

$$n=0,1,\ldots N-1$$

$$W\left(e^{j\omega}\right)=\frac{\sin\frac{N\omega}{2}}{\sin\frac{\omega}{2}}e^{-j\left[\frac{N-1}{2}\omega\right]}$$

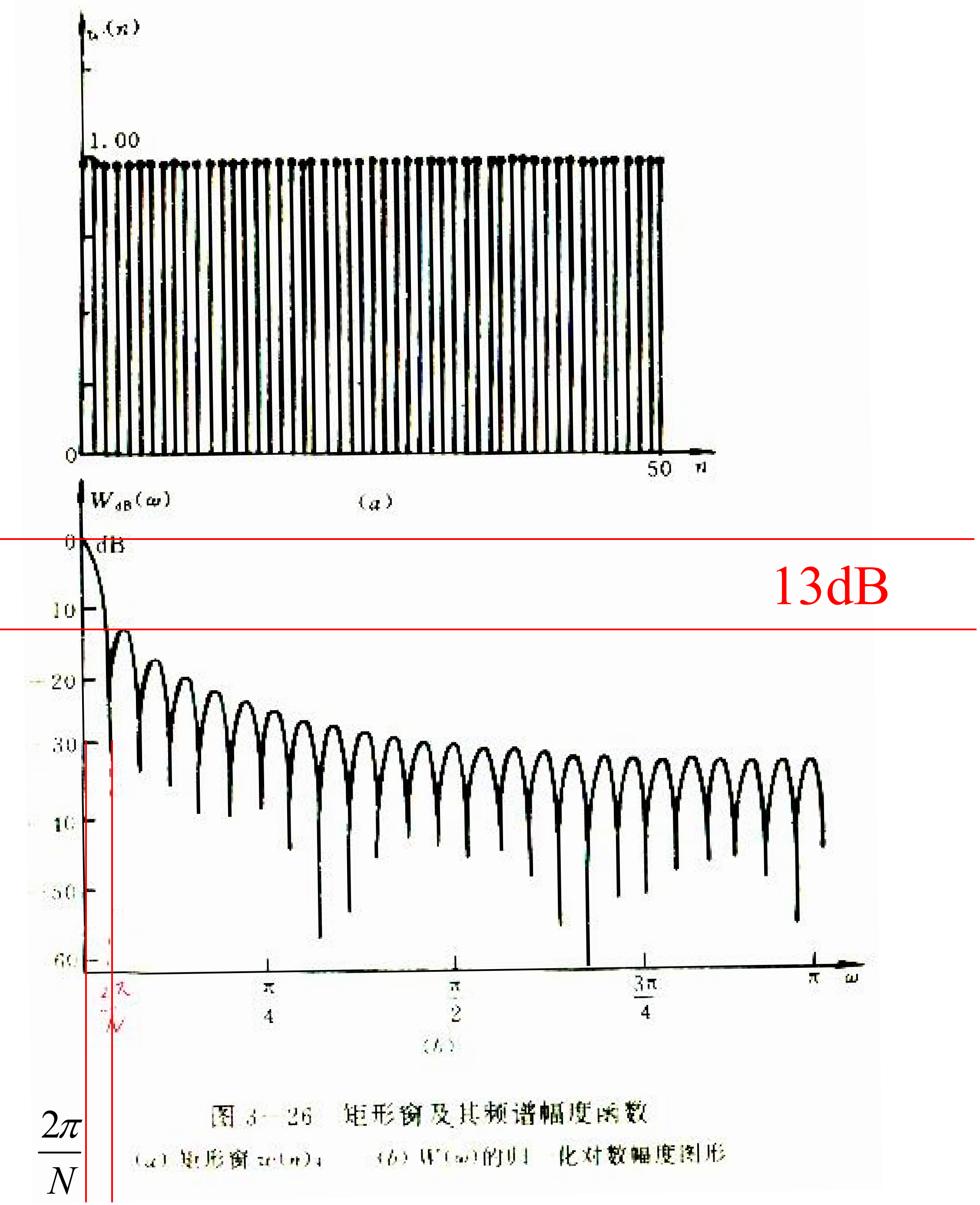


图 3-26 矩形窗及其频谱幅度函数

(a) 矩形窗 w(n)； (b) W(ω)的归一化对数幅度图形

2.三角形窗
（巴特利特Bartlett窗）

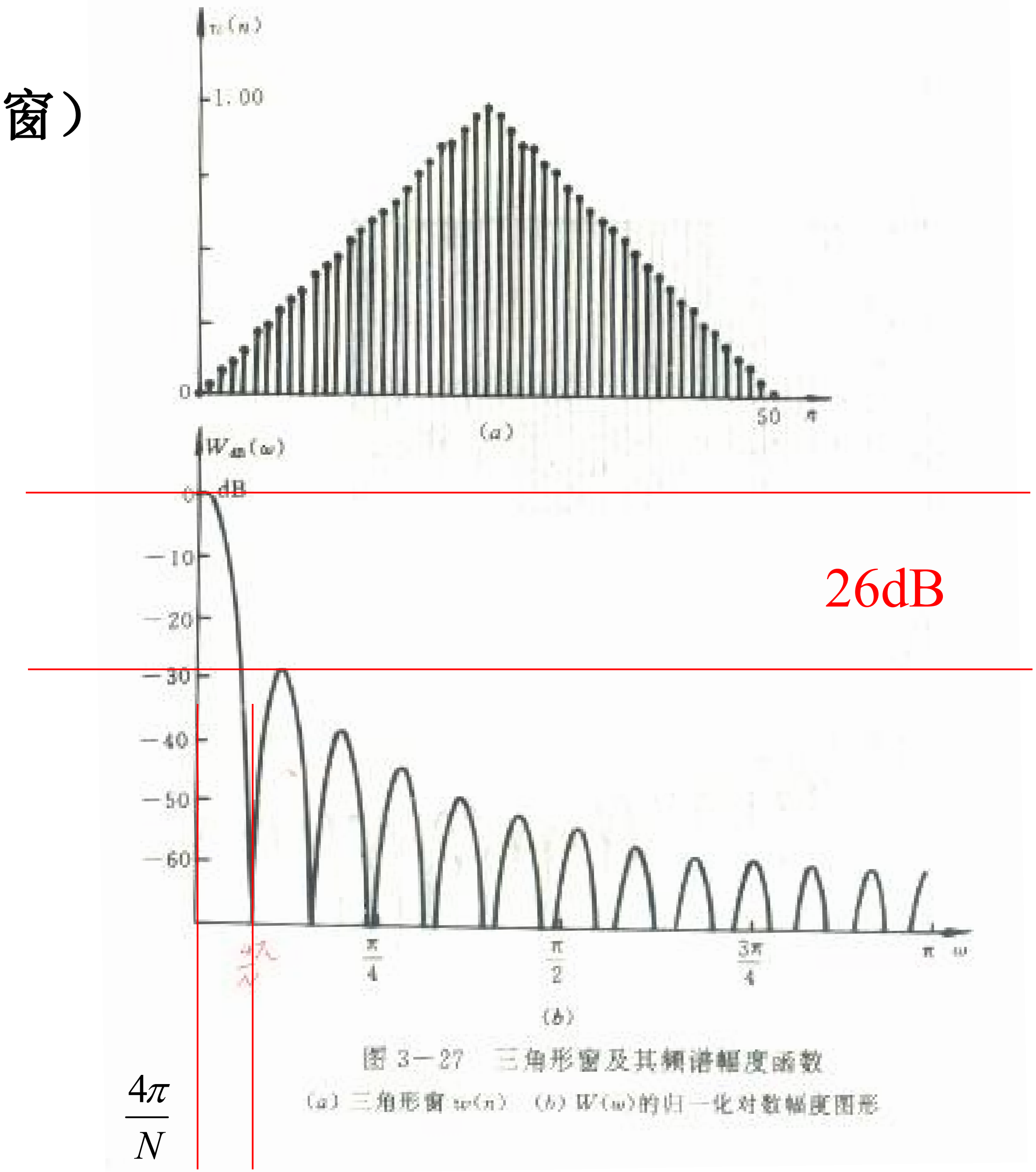


图 3—27 三角形窗及其频谱幅度函数

(a) 三角形窗 $w(n)$ (b) $W(\omega)$的归一化对数幅度图形

3.汉宁窗（Hanning Window）余弦平方窗，升余弦窗

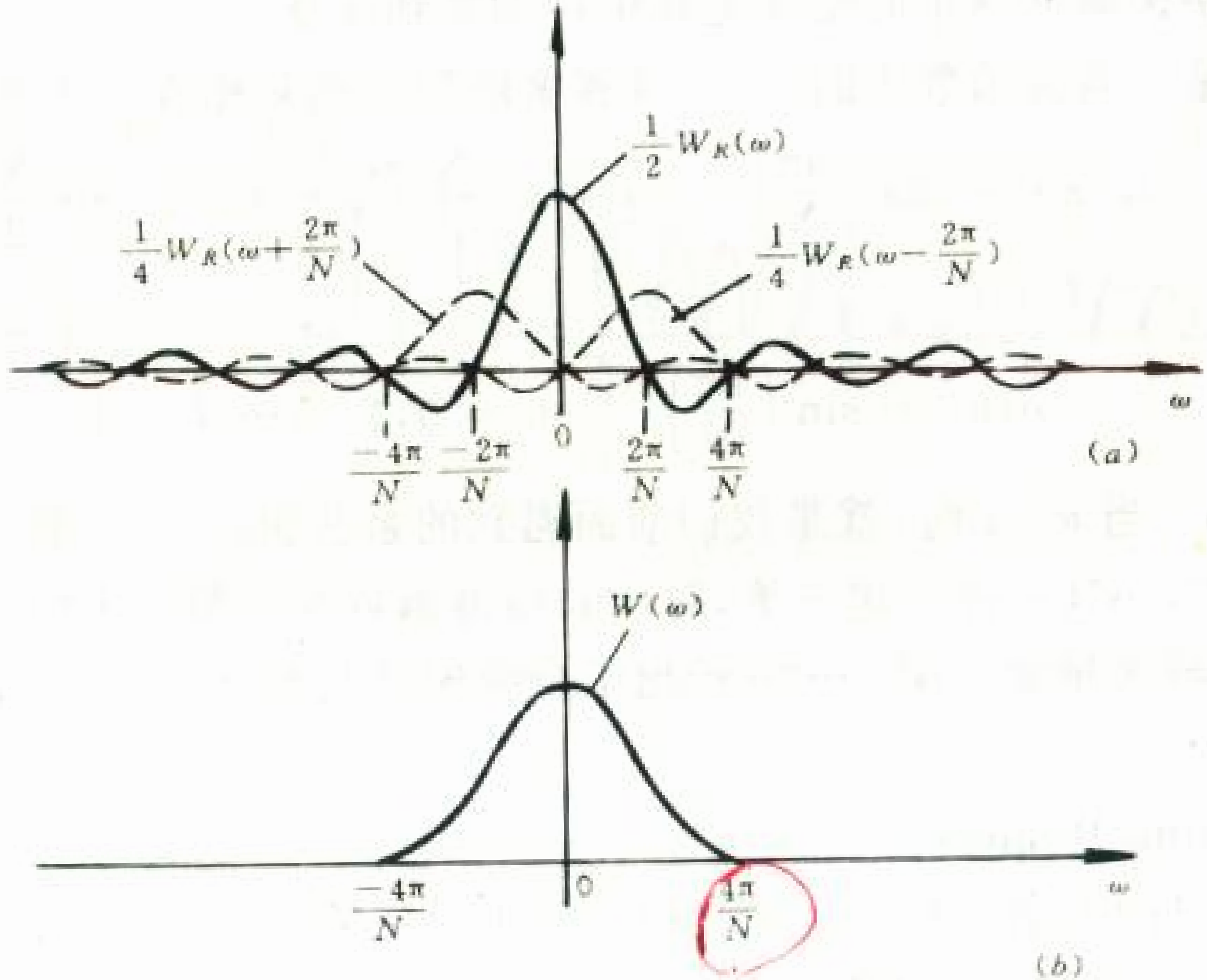


图 3—28 汉宁窗频谱

(a) 三个矩形窗幅度谱的叠加； (b) 汉宁窗频谱 $W(\omega)$主瓣

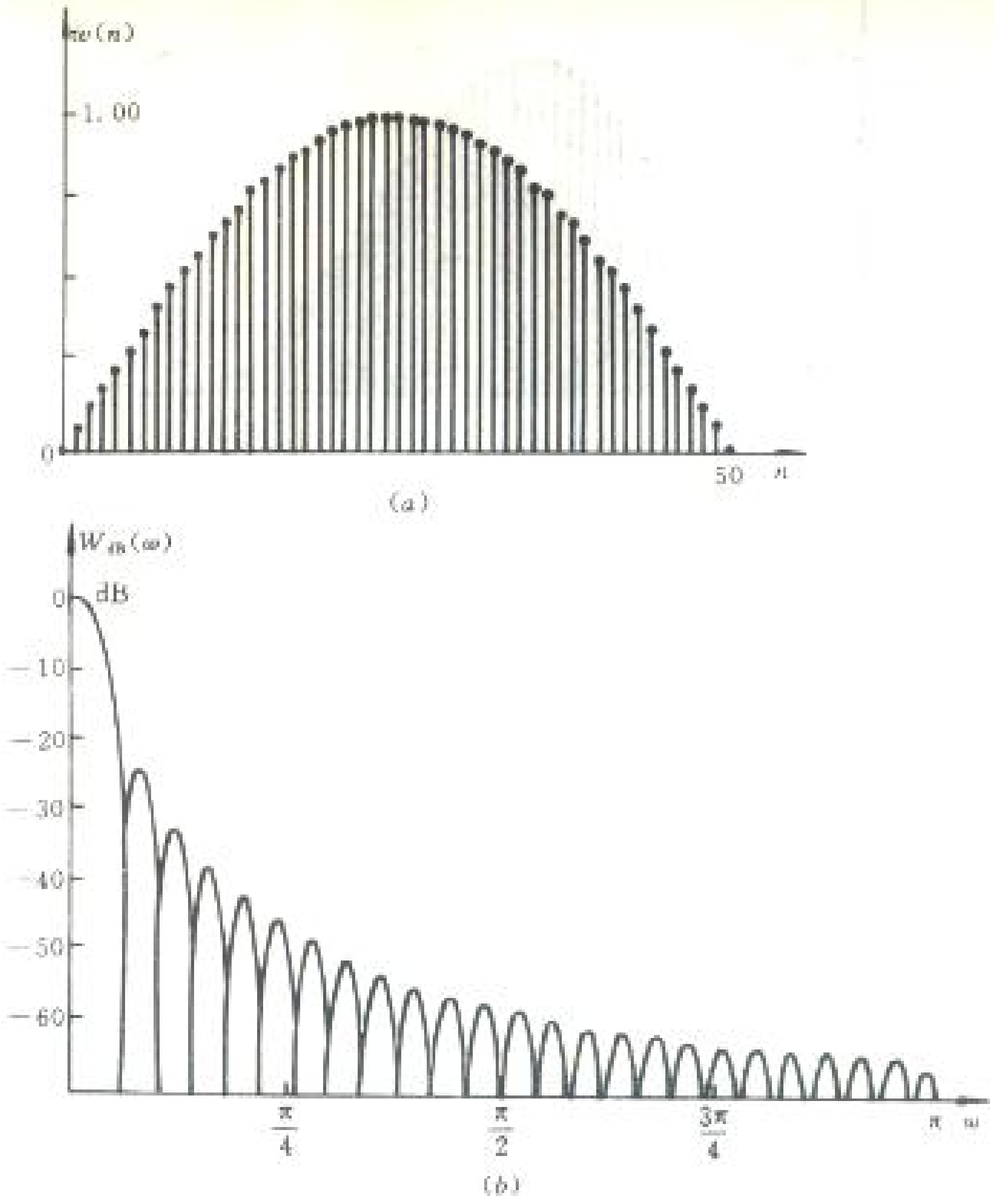


图 3-29　余弦窗及其频谱幅度函数

(a) 余弦窗 $w(n)$

(b) $W(\omega)$的归一化对数幅度图形

4.海明窗（Hamming Window）

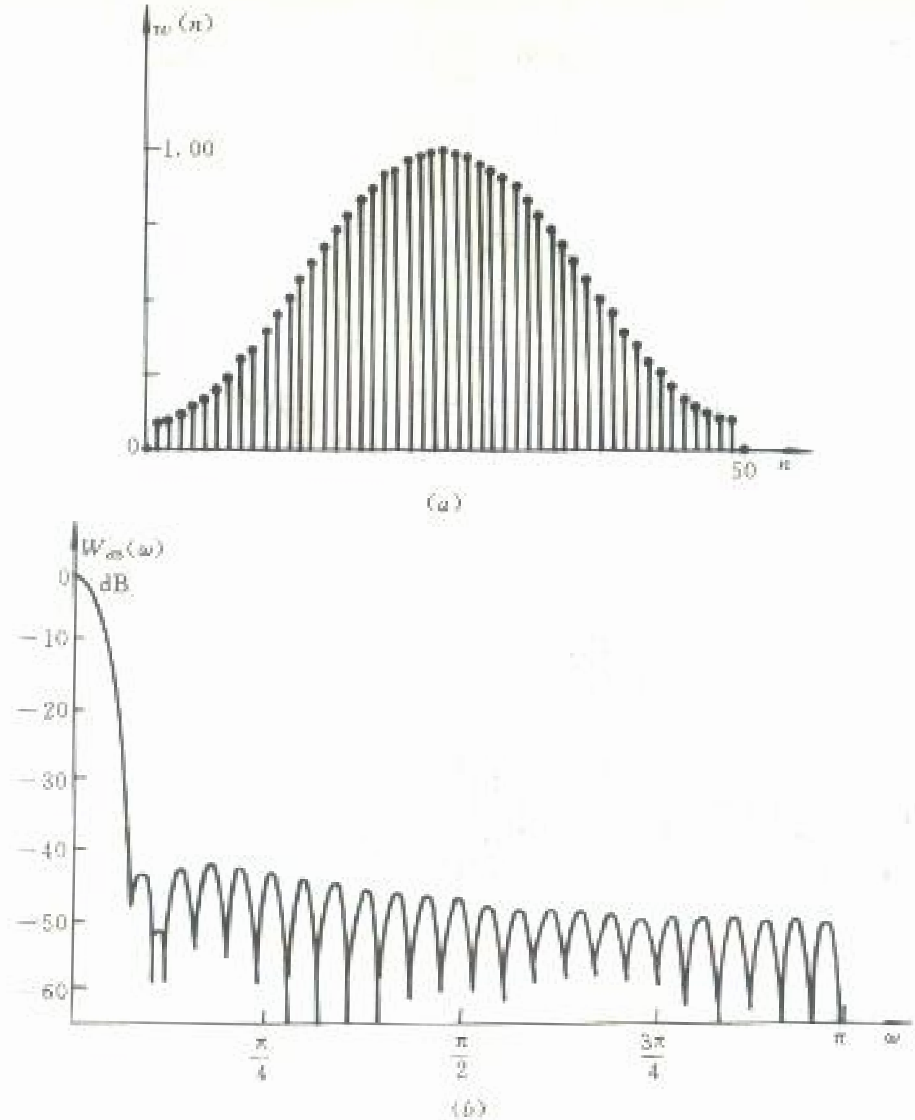


图 3—31　海明窗及其频谱幅度函数

(a) 海明窗 $w(n)$

(b) $W(\omega)$的归一化对数幅度图形

§3-8 加权技术与窗函数

5.布拉克曼窗（**Blackman Window**）

（二阶升余弦窗）

式(3-151)、 (3-152)，P114图3－32

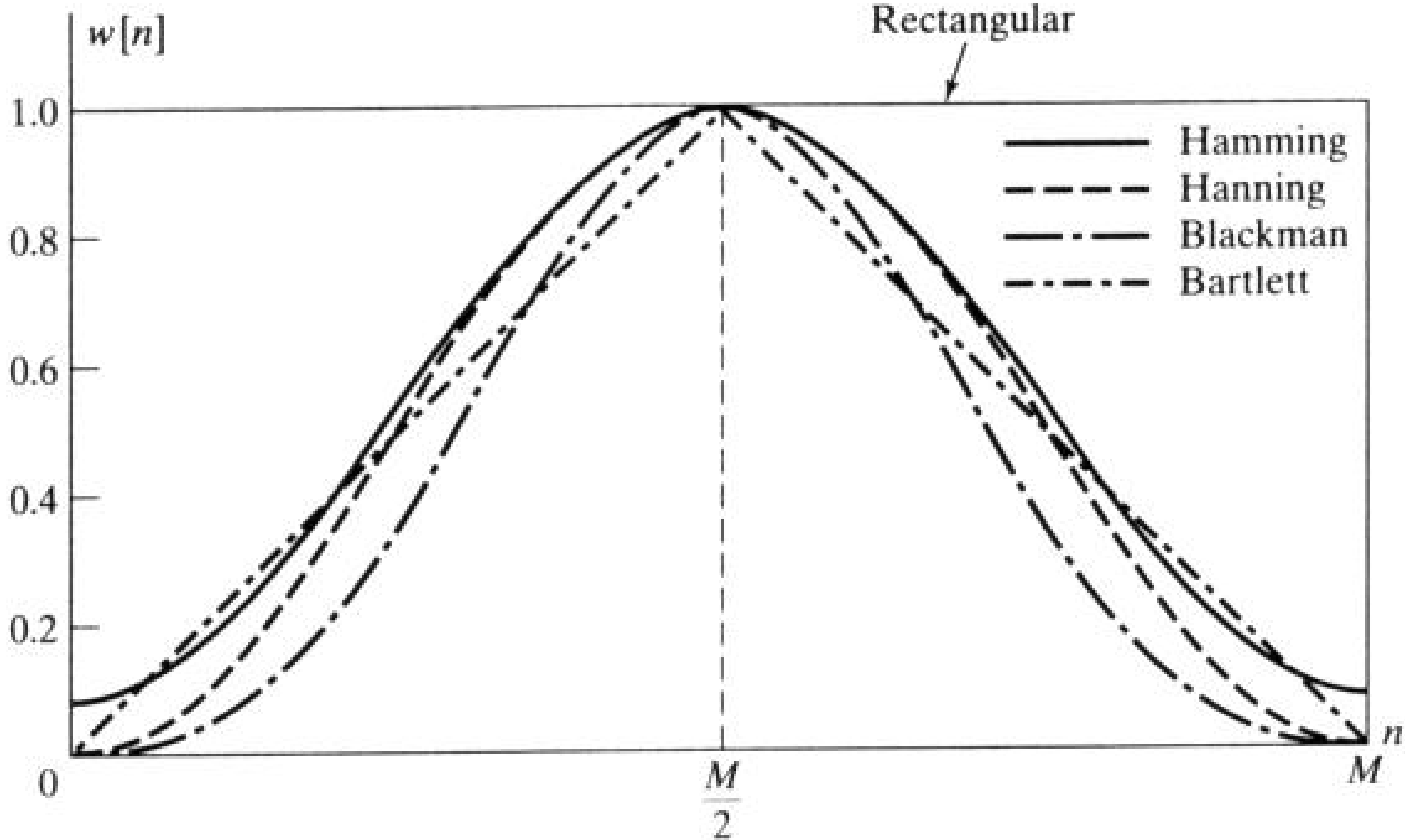
6.布拉克曼－哈利斯窗（**Harris**）

式(3-146)&表3－2、 (3-152)&表3－2 ，P116图3－34，P117图3－35

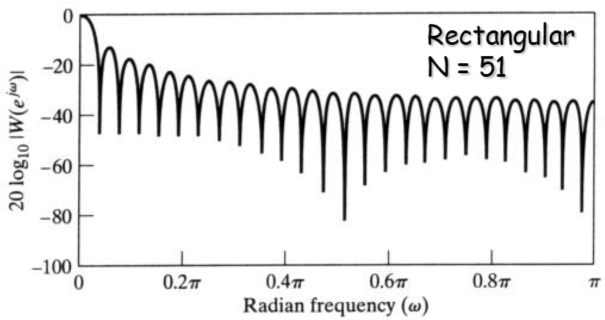
7.最优化窗

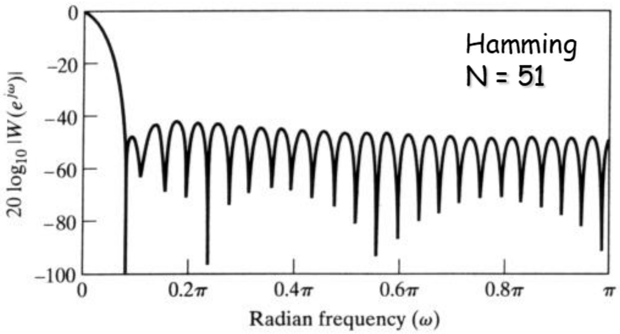
详见P116－118图3－36

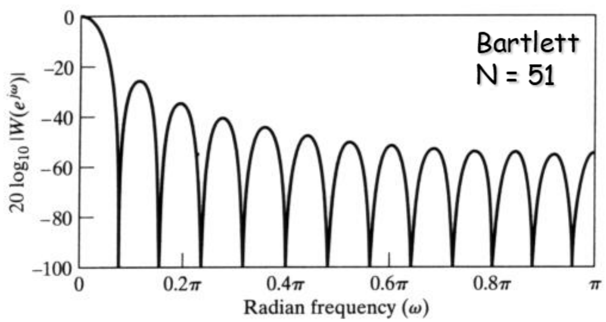
Shape of commonly used window functions.

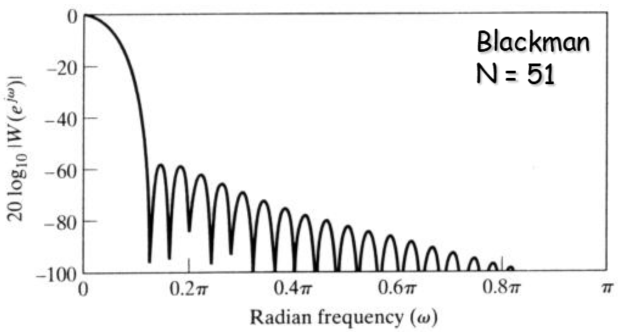


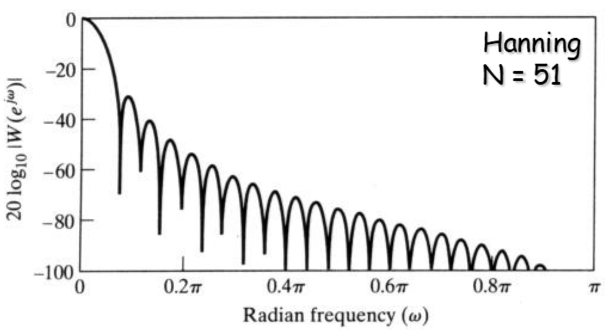
主瓣宽度v.s.副瓣高度

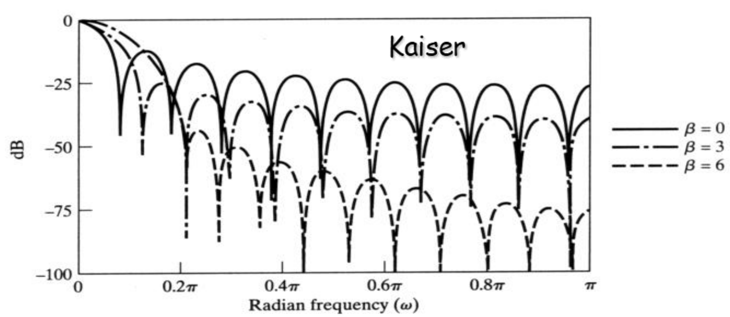

Rectangular
N = 51
0
-20
-40
-60
-80
-100
20 $\log_{10}|W(e^{j\omega})|$
0
0.2π
0.4π
0.6π
0.8π
π
Radian frequency (ω)

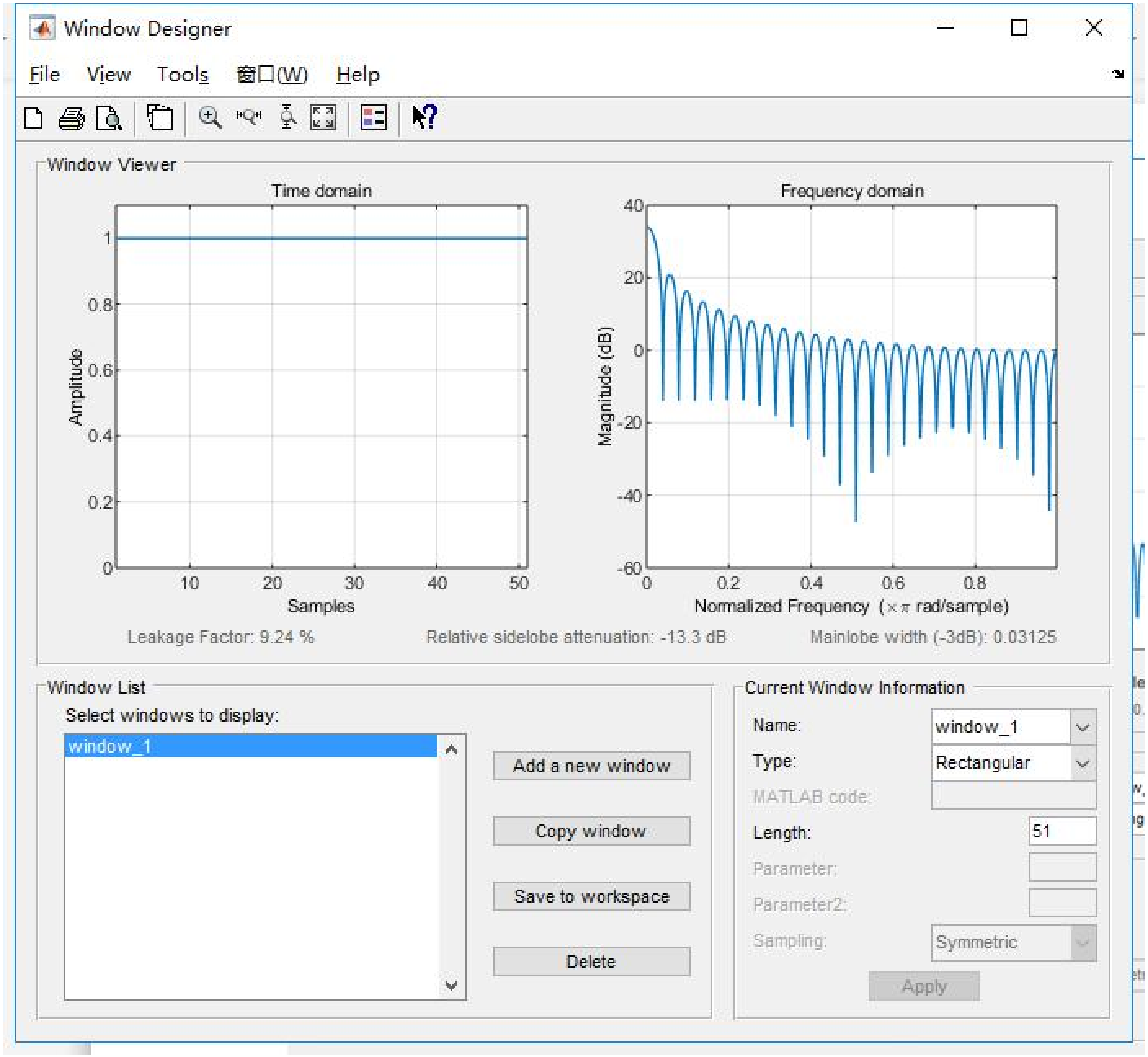

Hamming
N = 51
0
-20
-40
-60
-80
-100
20 $\log_{10}|W(e^{j\omega})|$
0
0.2π
0.4π
0.6π
0.8π
π
Radian frequency (ω)

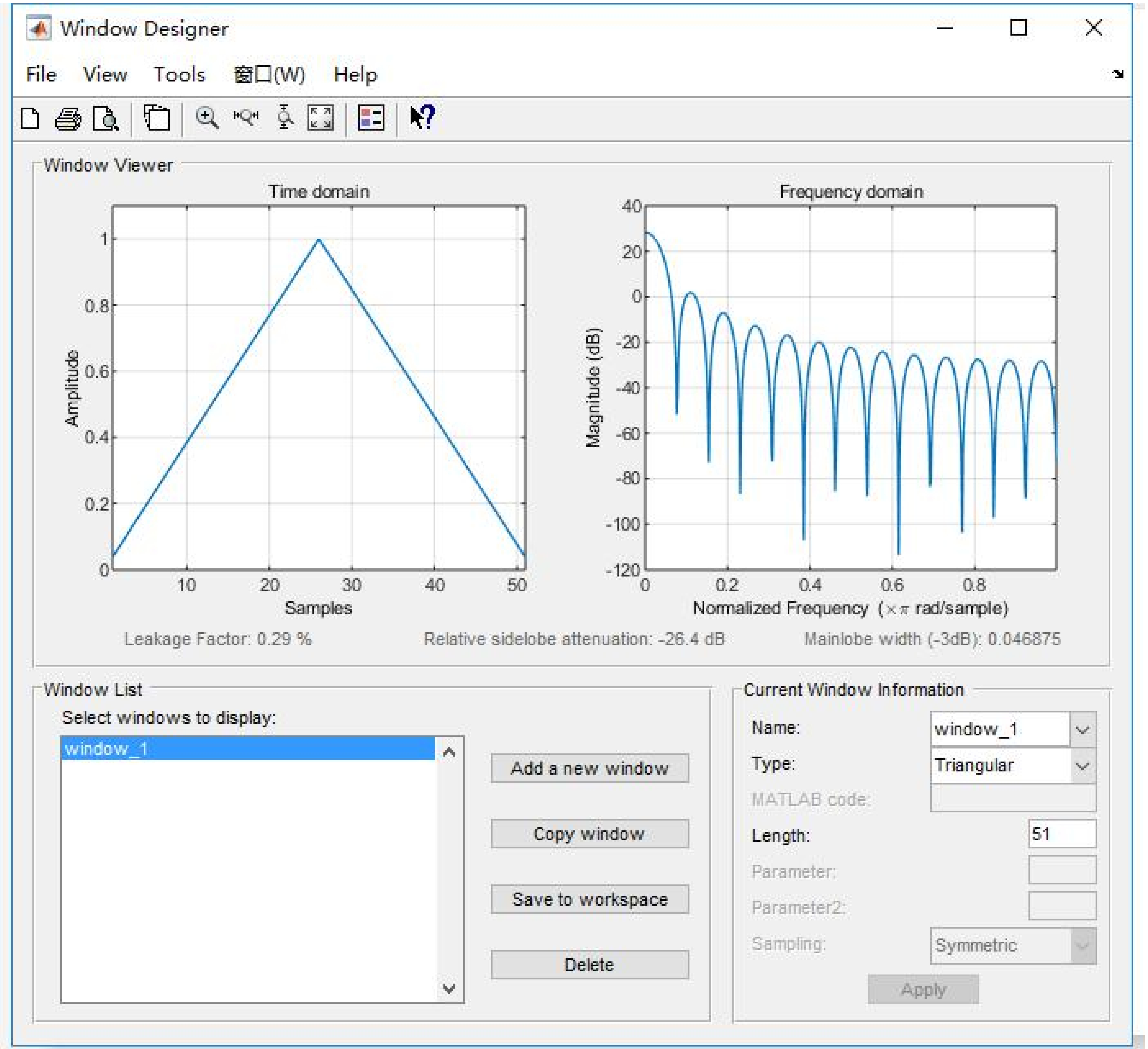

Bartlett
N = 51
0
-20
-40
-60
-80
-100
20 $\log_{10}|W(e^{j\omega})|$
0
0.2π
0.4π
0.6π
0.8π
π
Radian frequency (ω)


Blackman
N = 51
0
-20
-40
-60
-80
-100
20 $\log_{10}|W(e^{j\omega})|$
0
0.2π
0.4π
0.6π
0.8π
π
Radian frequency (ω)

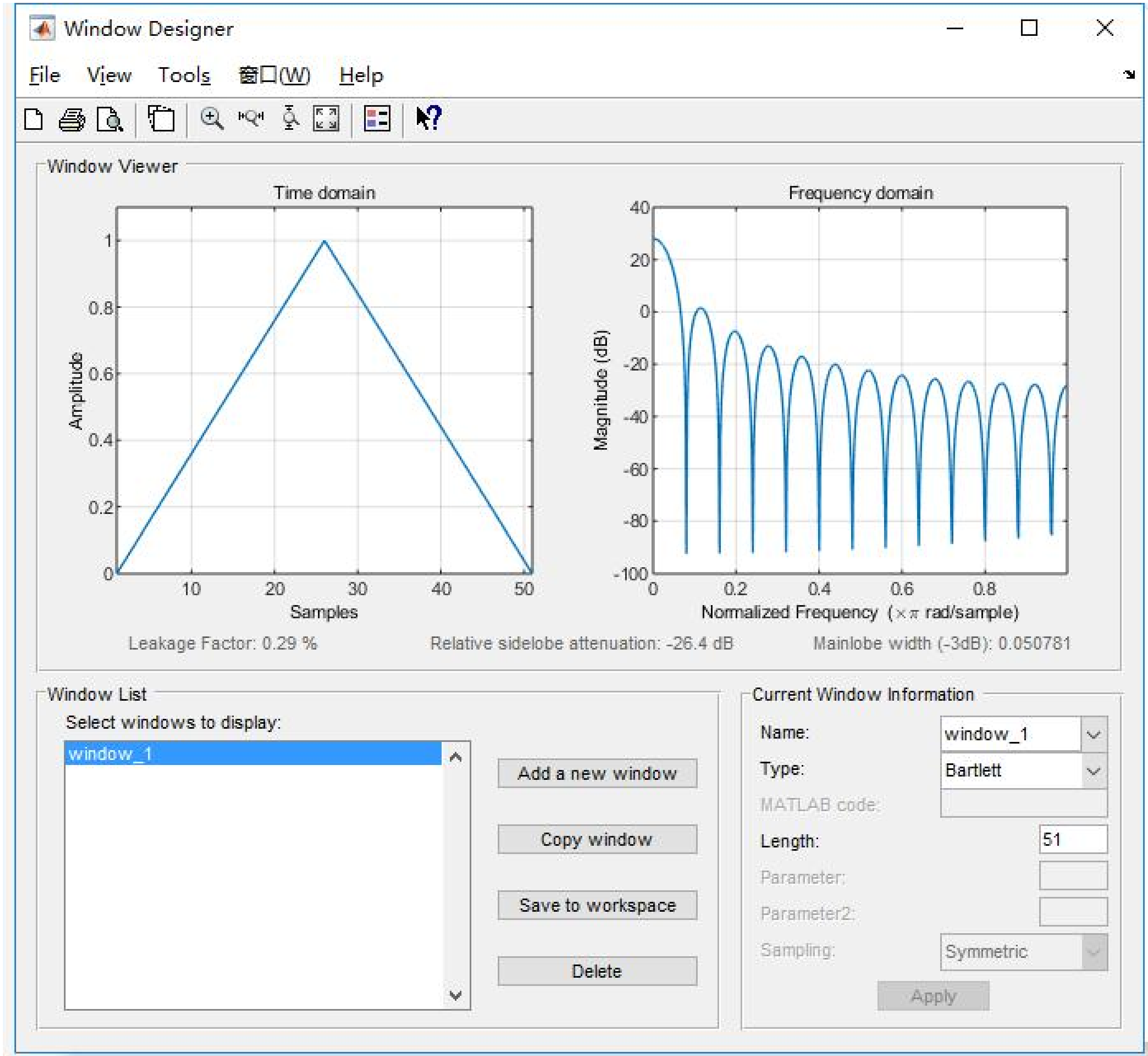

Hanning
N = 51
0
-20
-40
-60
-80
-100
20 $\log_{10}|W(e^{j\omega})|$
0
0.2π
0.4π
0.6π
0.8π
π
Radian frequency (ω)

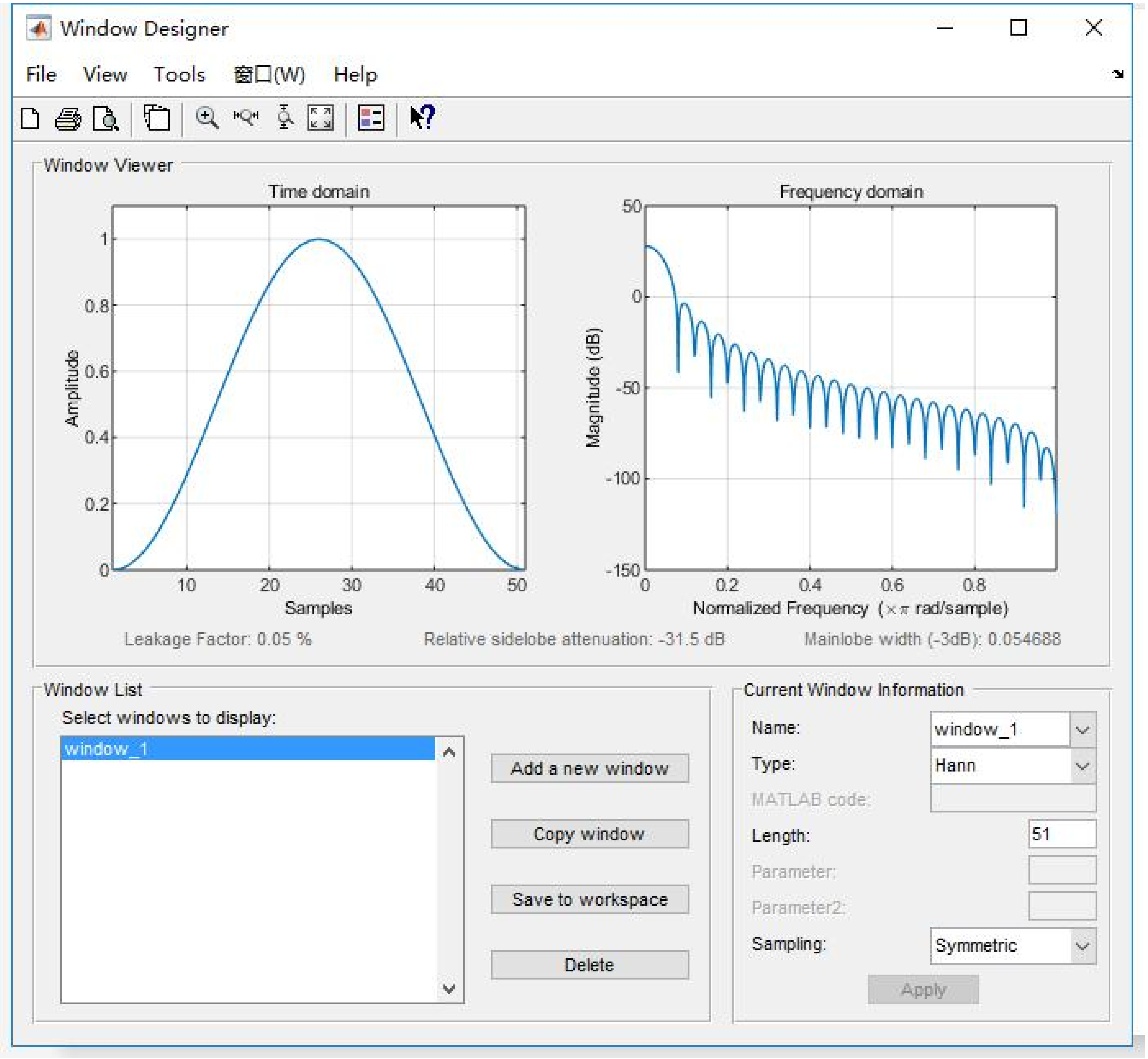

Kaiser
0
-25
-50
-75
-100
dB
0
0.2π
0.4π
0.6π
0.8π
π
Radian frequency (ω)
β = 0
β = 3
β = 6

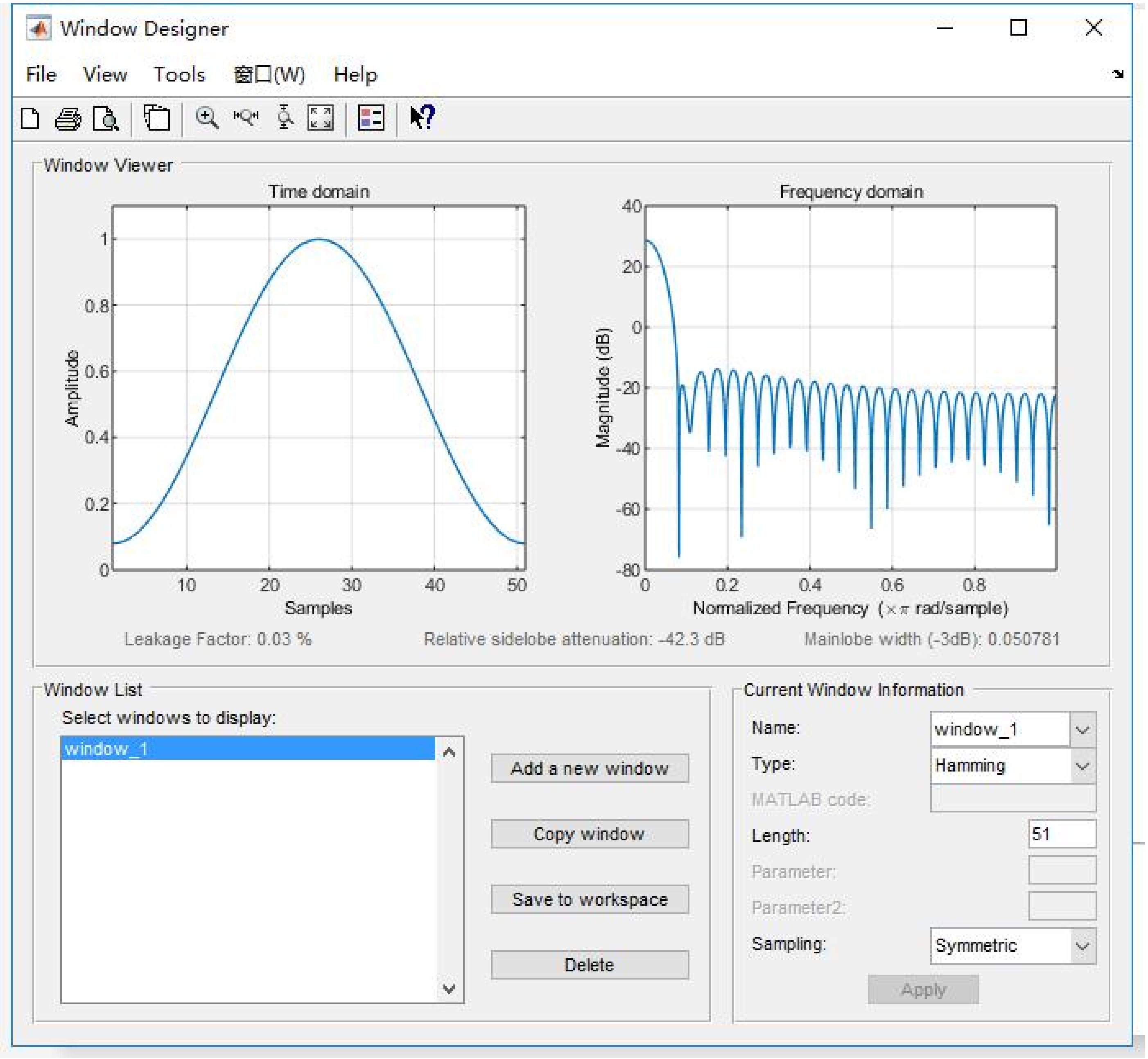

Window Designer
File View Tools 窗口(W) Help
Window Viewer
Time domain
Amplitude
Samples
Frequency domain
Magnitude (dB)
Normalized Frequency (×π rad/sample)
Leakage Factor: 9.24 %
Relative sidelobe attenuation: -13.3 dB
Mainlobe width (-3dB): 0.03125
Window List
Select windows to display:
window_1
Add a new window
Copy window
Save to workspace
Delete
Current Window Information
Name: window_1
Type: Rectangular
MATLAB code:
Length: 51
Parameter:
Parameter2:
Sampling: Symmetric
Apply

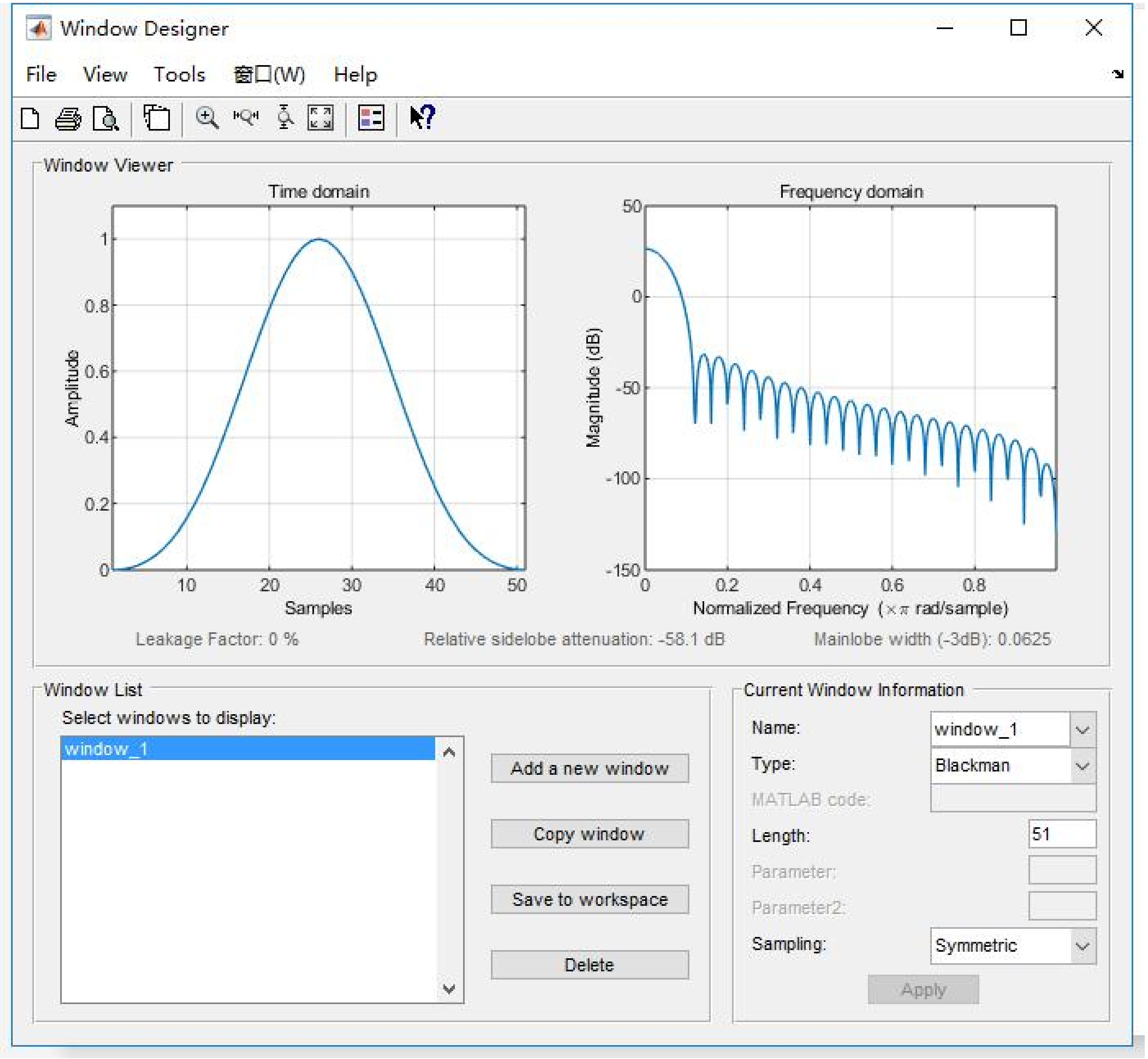


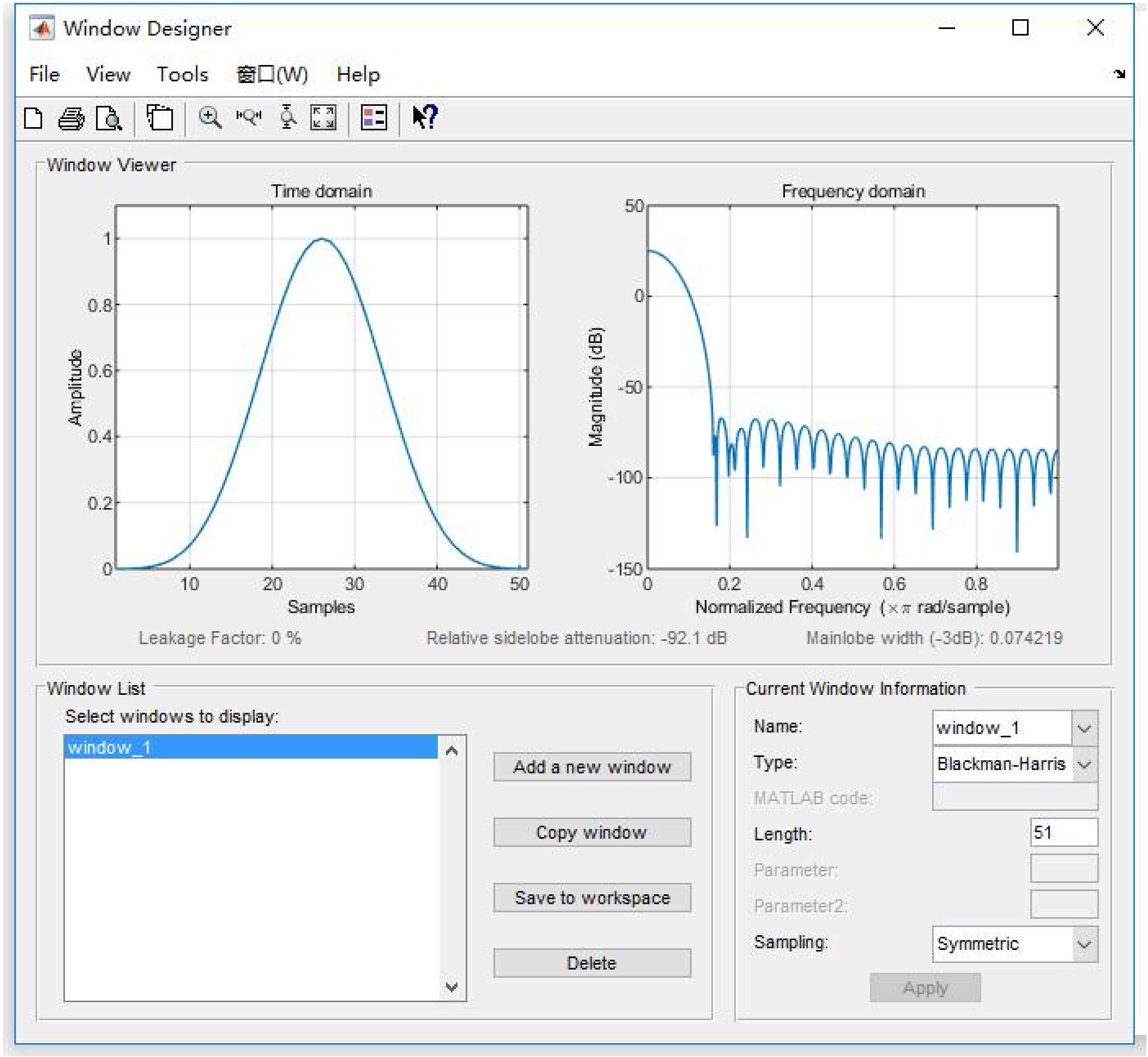
Window Designer
File View Tools 窗口(W) Help
Window Viewer
Time domain
Frequency domain
Amplitude
Samples
Magnitude (dB)
Normalized Frequency (×π rad/sample)
Leakage Factor: 0.29 %
Relative sidelobe attenuation: -26.4 dB
Mainlobe width (-3dB): 0.046875
Window List
Select windows to display:
window_1
Add a new window
Copy window
Save to workspace
Delete
Current Window Information
Name:
window_1
Type:
Triangular
MATLAB code:
Length:
51
Parameter:
Parameter2:
Sampling:
Symmetric
Apply

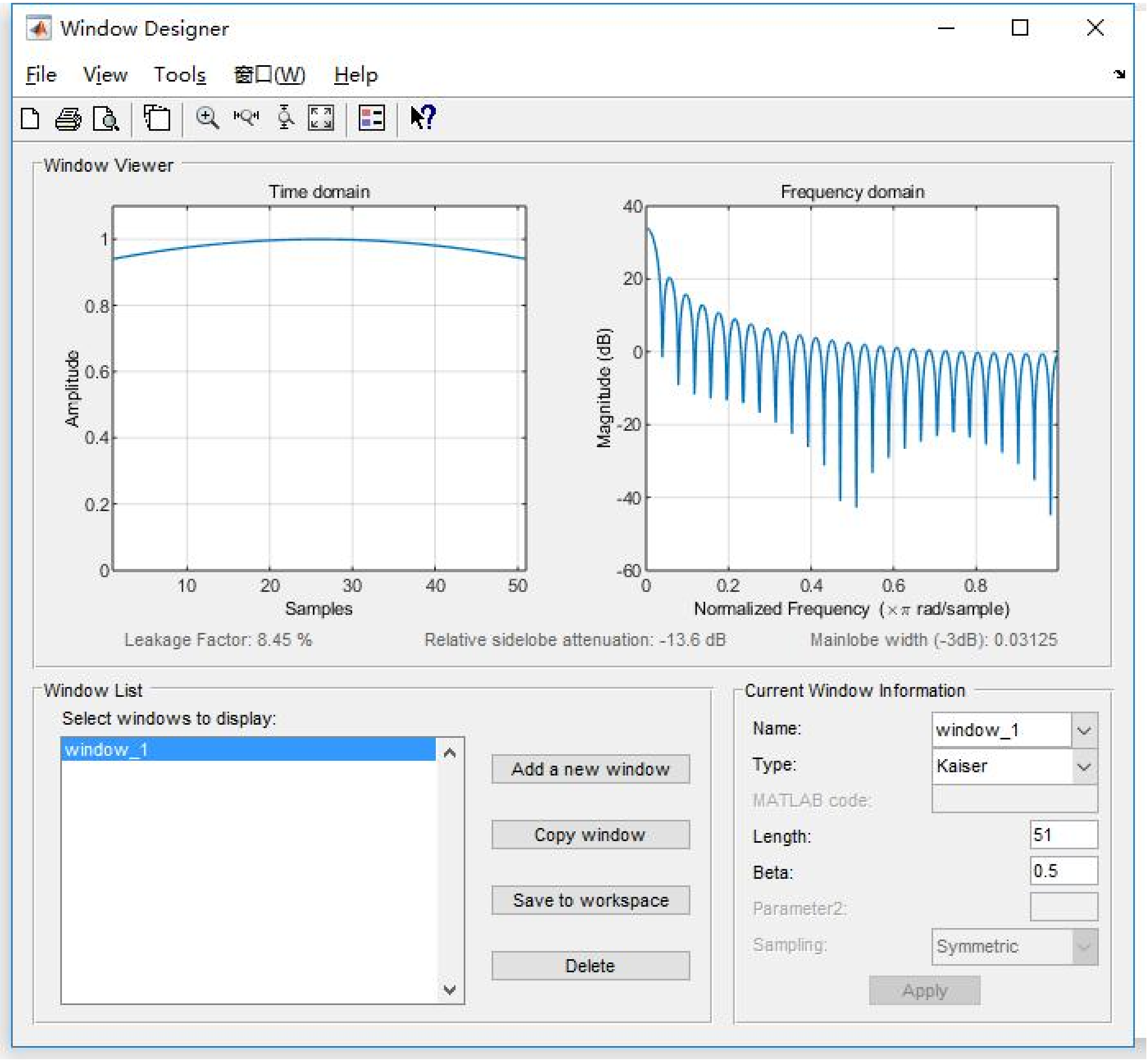

Window Designer
File View Tools 窗口(W) Help
Window Viewer
Time domain
Frequency domain
Amplitude
Samples
Magnitude (dB)
Normalized Frequency (×π rad/sample)
Leakage Factor: 0.29 %
Relative sidelobe attenuation: -26.4 dB
Mainlobe width (-3dB): 0.050781
Window List
Select windows to display:
window_1
Add a new window
Copy window
Save to workspace
Delete
Current Window Information
Name:
window_1
Type:
Bartlett
MATLAB code:
Length:
51
Parameter:
Parameter2:
Sampling:
Symmetric
Apply


Window Designer
File View Tools 窗口(W) Help
Window Viewer
Time domain
Frequency domain
Amplitude
Samples
Magnitude (dB)
Normalized Frequency (×π rad/sample)
Leakage Factor: 0.05 %
Relative sidelobe attenuation: -31.5 dB
Mainlobe width (-3dB): 0.054688
Window List
Select windows to display:
window_1
Add a new window
Copy window
Save to workspace
Delete
Current Window Information
Name: window_1
Type: Hann
MATLAB code:
Length: 51
Parameter:
Parameter2:
Sampling: Symmetric
Apply

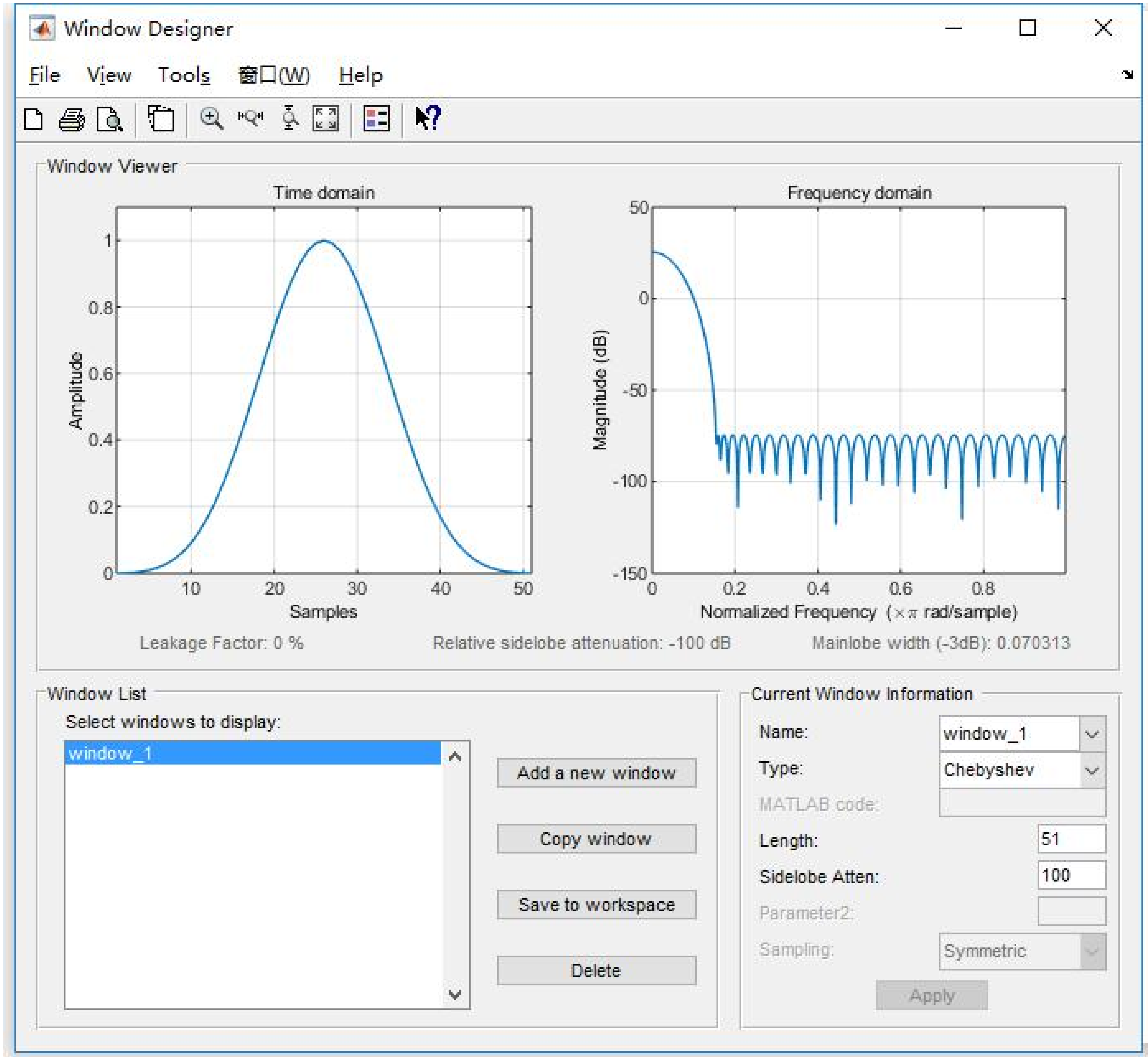

Window Designer
File View Tools 窗口(W) Help
Window Viewer
Time domain
Frequency domain
Amplitude
Samples
Magnitude (dB)
Normalized Frequency (×π rad/sample)
Leakage Factor: 0.03 %
Relative sidelobe attenuation: -42.3 dB
Mainlobe width (-3dB): 0.050781
Window List
Select windows to display:
window_1
Add a new window
Copy window
Save to workspace
Delete
Current Window Information
Name:
window_1
Type:
Hamming
MATLAB code:
Length:
51
Parameter:
Parameter2:
Sampling:
Symmetric
Apply

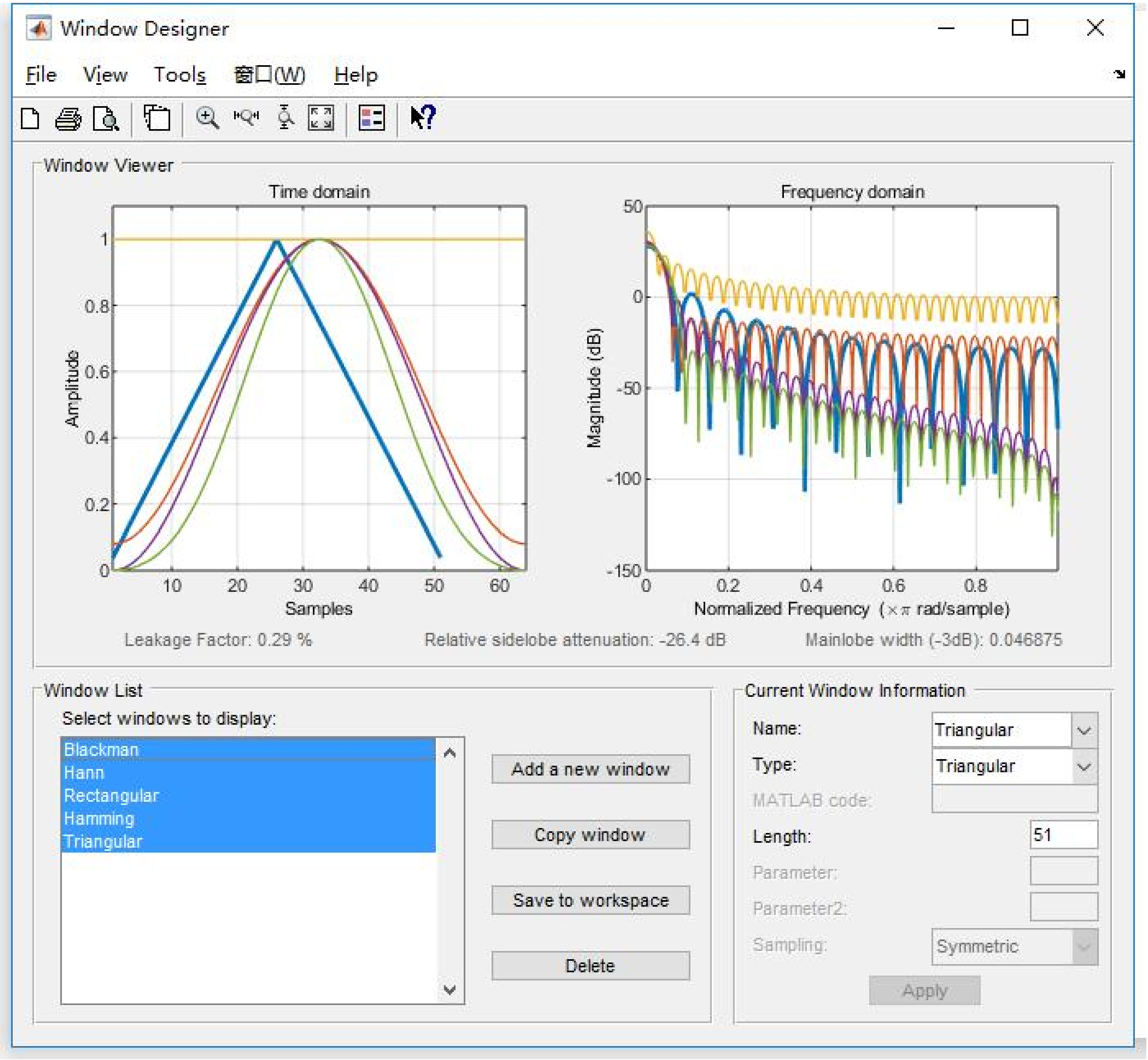

Window Designer
File View Tools 窗口(W) Help
Window Viewer
Time domain
Frequency domain
Amplitude
Samples
Magnitude (dB)
Normalized Frequency (×π rad/sample)
Leakage Factor: 0 %
Relative sidelobe attenuation: -58.1 dB
Mainlobe width (-3dB): 0.0625
Window List
Select windows to display:
window_1
Add a new window
Copy window
Save to workspace
Delete
Current Window Information
Name:
window_1
Type:
Blackman
MATLAB code:
Length:
51
Parameter:
Parameter2:
Sampling:
Symmetric
Apply

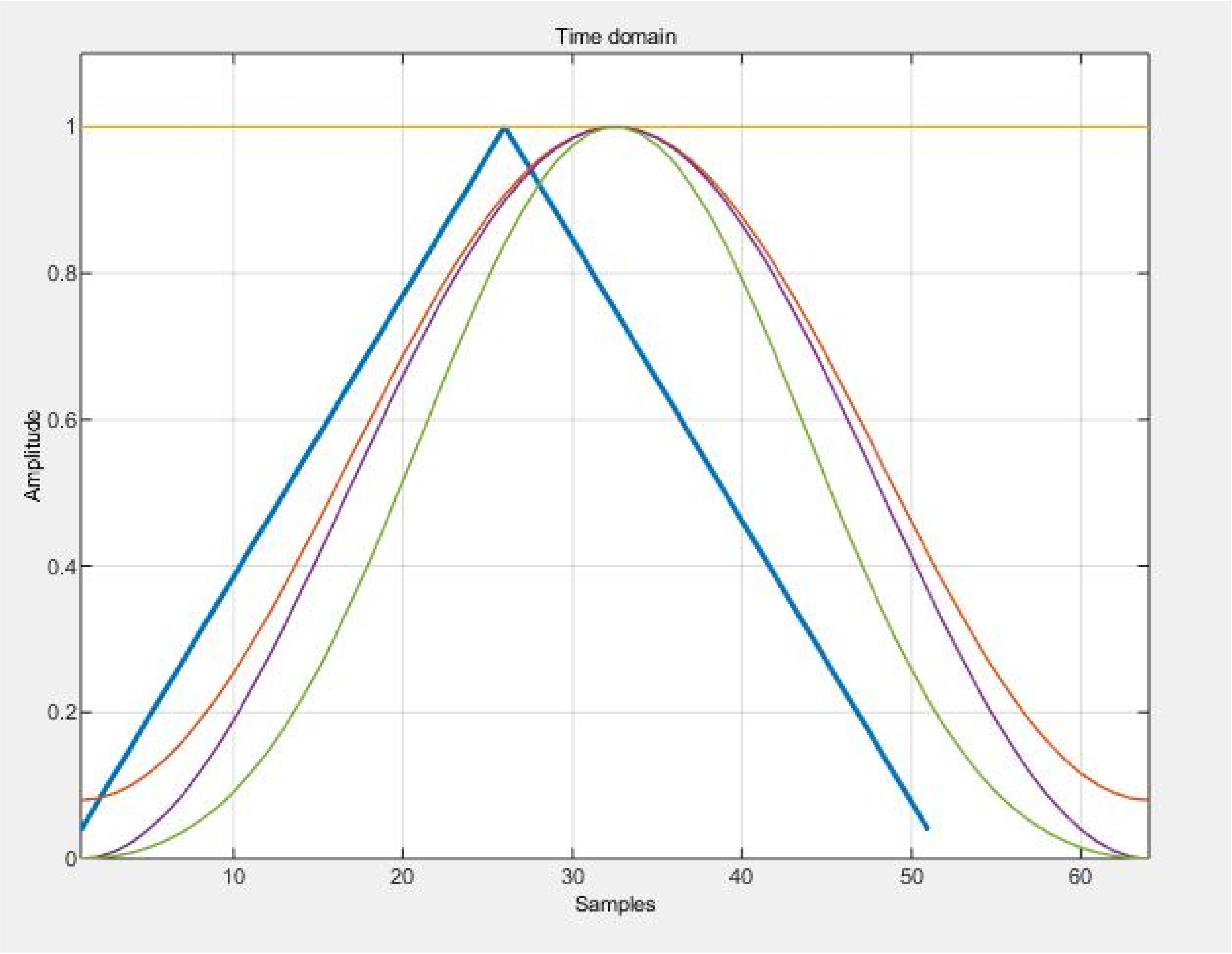

Window Designer
File View Tools 窗口(W) Help
Window Viewer
Time domain
Amplitude
Samples
Frequency domain
Magnitude (dB)
Normalized Frequency (×π rad/sample)
Leakage Factor: 0 %
Relative sidelobe attenuation: -92.1 dB
Mainlobe width (-3dB): 0.074219
Window List
Select windows to display:
window_1
Add a new window
Copy window
Save to workspace
Delete
Current Window Information
Name: window_1
Type: Blackman-Harris
MATLAB code:
Length: 51
Parameter:
Parameter2:
Sampling: Symmetric
Apply



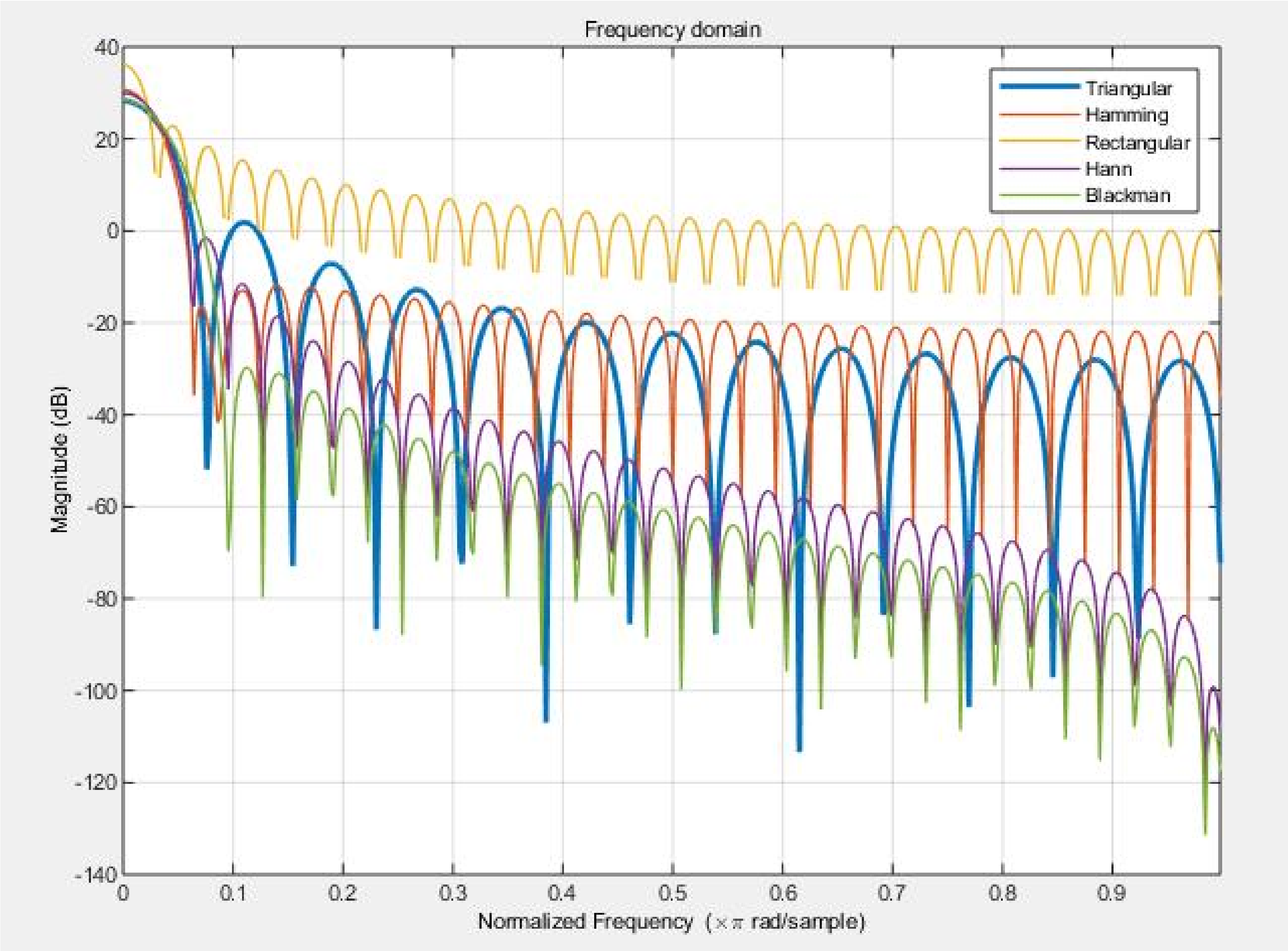
Window Designer
File View Tools 窗口(W) Help
Window Viewer
Time domain
Amplitude
Samples
Frequency domain
Magnitude (dB)
Normalized Frequency (×π rad/sample)
Leakage Factor: 8.45 %
Relative sidelobe attenuation: -13.6 dB
Mainlobe width (-3dB): 0.03125
Window List
Select windows to display:
window_1
Add a new window
Copy window
Save to workspace
Delete
Current Window Information
Name: window_1
Type: Kaiser
MATLAB code:
Length: 51
Beta: 0.5
Parameter2:
Sampling: Symmetric
Apply


Window Designer
File View Tools 窗口(W) Help
Window Viewer
Time domain
Amplitude
Samples
Frequency domain
Magnitude (dB)
Normalized Frequency (×π rad/sample)
Leakage Factor: 0 %
Relative sidelobe attenuation: -100 dB
Mainlobe width (-3dB): 0.070313
Window List
Select windows to display:
window_1
Add a new window
Copy window
Save to workspace
Delete
Current Window Information
Name: window_1
Type: Chebyshev
MATLAB code:
Length: 51
Sidelobe Atten: 100
Parameter2:
Sampling: Symmetric
Apply

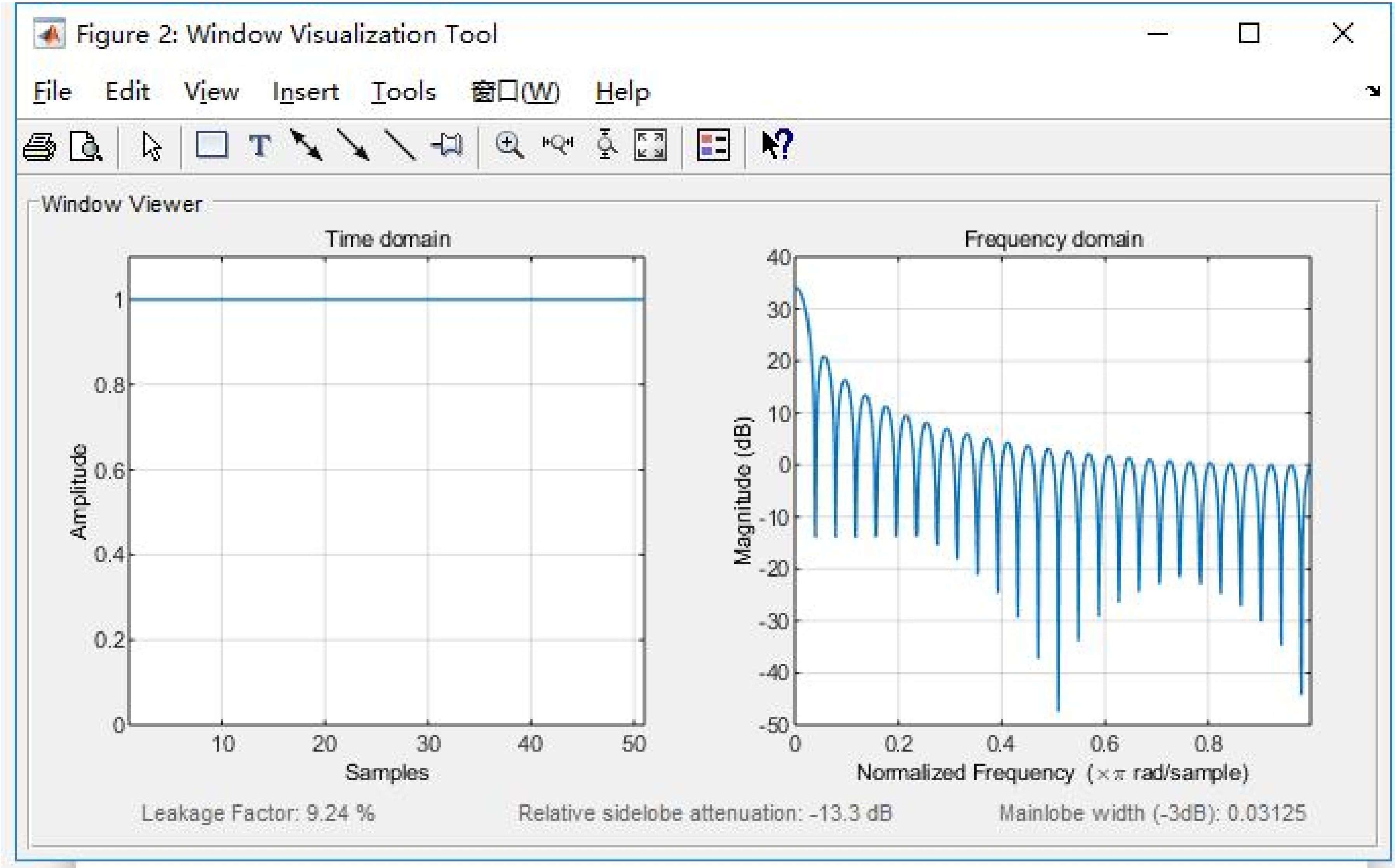

Window Designer
File View Tools 窗口(W) Help
Window Viewer
Time domain
Amplitude
Samples
Frequency domain
Magnitude (dB)
Normalized Frequency (×π rad/sample)
Leakage Factor: 0.29 %
Relative sidelobe attenuation: -26.4 dB
Mainlobe width (-3dB): 0.046875
Window List
Select windows to display:
Blackman
Hann
Rectangular
Hamming
Triangular
Add a new window
Copy window
Save to workspace
Delete
Current Window Information
Name:
Triangular
Type:
Triangular
MATLAB code:
Length:
51
Parameter:
Parameter2:
Sampling:
Symmetric
Apply



Time domain
Amplitude
Samples
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
10
20
30
40
50
60


Frequency domain
Triangular
Hamming
Rectangular
Hann
Blackman
Magnitude (dB)
Normalized Frequency (×π rad/sample)
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
-140
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9

```
>> wvtool(rectwin(51))
```



第3章 回顾

1.四种傅氏变换
2.DFS
3.DFS性质
4.DFT
5.DFT性质
6.频域采样
7.用DFT对连续时间信号逼近的问题
8.加权技术和窗函数