SHUZI XINHAO CHULI
YUANLI YU SHIJIAN

数字信号处理原理与实践

刘纪红　孙宇舸　李景华　等编著

国防工业出版社
National Defense Industry Press

数字信号处理原理与实践

刘纪红　孙宇舸　李景华　等编著

国防工業出版社

·北京·

内容简介

本书结合Matlab仿真软件和相关硬件平台，较系统地讨论了数字信号处理的基本理论、基本方法、基本算法和典型的应用实例。全书共分为9章。前4章主要讨论了离散时间信号与系统、z变换、离散傅里叶变换和快速傅里叶变换；第5章～第7章讨论了数字滤波器的基本结构、无限长单位冲激响应滤波器和有限长单位冲激响应滤波器，并给出了在Matlab环境下的滤波器设计方法和实例；第8章结合TI公司的TMS320系列芯片介绍了数字信号处理器和相关设计及应用的平台；第9章从话音和图像处理的角度出发，论述了DSP应用实例。本书结合实例进行论述，条理清楚、深入浅出，便于自学和快速应用。

本书可以作为大专院校通信工程、电子信息工程、信息工程、自动控制工程和生物医学工程等专业的教材，也可以作为通信和信息技术、图像处理、遥感、雷达、话音处理和生物信息处理等领域从事信号处理的科学工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理原理与实践/刘纪红等编著. —北京：国防工业出版社，2009.1
ISBN 978-7-118-05995-3

Ⅰ.数… Ⅱ.刘… Ⅲ.数字信号－信号处理
Ⅳ.TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第156716号

※

国防工業出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)
天利华印刷装订有限公司印刷
新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 **印张** 15 **字数** 341千字
2009年1月第1版第1次印刷 **印数** 1—4000册 **定价** 28.00元

国防书店：(010)68428422 发行邮购：(010)68414474
发行传真：(010)68411535 发行业务：(010)68472764

前　言

随着信息和微电子学科的飞速发展,数字信号处理理论和应用技术日益受到重视,这一方面的技术人才的需求也日益增加。为了培养高水平的相关技术人才,各大专院校目前都非常重视数字信号处理课程的建设,尤其需求能将数字信号处理理论和实际应用相结合的教材和参考书。本书正是为了满足广大理工科本科生、研究生和相关科研技术工作者的需求而编写的。

本书共分为 9 章,包含三个环节:数字信号处理的基本理论和算法(第 1 章～第 4 章)、数字滤波器的结构和设计(第 5 章～第 7 章),以及数字信号处理的应用(第 8 章和第 9 章)。

在第一个环节中,较详细地讨论了离散时间信号和系统的一些基本的概念,给出了离散时间信号的表示方式,以及一些信号处理中的常用的运算。建立了离散系统的概念以及离散系统的一些性质和表示方式。之后,介绍了 z 变换定义, z 变换的收敛域, z 变换的性质, z 反变换及其计算,以及系统函数及其收敛域与系统性质的关系。

傅里叶变换是信号从时间域变换到频率域的重要工具,是数字信号处理与分析的重要手段。因此,本书第 3 章首先介绍了傅里叶变换的几种形式,以及周期序列的傅里叶级数、有限长序列的傅里叶变换和它们的重要性质。最后介绍了用 DFT 计算线性卷积的方法。在第 5 章中介绍了快速傅里叶变换的算法原理和计算机实现方法。

在第二个环节中,重点论述了数字滤波器的基本结构、无限长单位冲激响应滤波器和有限长单位冲激响应滤波器,并给出了在 Matlab 环境下的滤波器设计方法和实例。

在第三个环节中,结合 TI 公司的 TMS320 系列芯片介绍了数字信号处理器、相关设计和应用的平台。并以实现话音滤波和基于图像的目标跟踪为目标,分别论述了在 TMS320C5402 DSK 板和 TMS320DM642 EVM 板上实现相关 DSP 应用实例的设计和实现过程。

Matlab 是学习和应用数字信号处理的一个很好的工具,因此本书突出了对此工具的应用。读者通过书中的 Matlab 例题可以更好、更快地掌握数字信号处理的理论和计算机辅助设计技术。

本书第 1 章和第 2 章由孙宇舸编写,第 4 章和第 5 章由叶柠编写,第 3 章、第 6 章和第 7 章由田亚男编写,第 8 章和第 9 章由刘纪红编写。刘纪红、李景华和孙宇舸对全书进行了审阅,刘纪红对全书进行了统稿。

感谢研究生许强、冯宇光、邵冠楠等同学为本书的出版所做的绘图和实验工作。感谢研究所同仁提出的宝贵意见。

限于编者的水平,对书中不妥和错误之处,殷切希望读者不吝指正。

目　录

第1章　离散时间信号与系统

信号是传载信息的函数，在数学上信号可以表示为一个或多个独立变量的函数。这些独立变量可以是连续的，也可以是离散的。在连续时间域上定义的信号称为连续时间信号或模拟信号，在离散时间点上定义的信号称为离散时间信号。数字信号是在时间与幅值上都离散化的信号。当一个系统的输入和输出都是连续时间信号，称该系统为连续时间系统；当一个系统的输入和输出都是离散时间信号，称该系统为离散时间系统。在数字信号处理中，研究和处理的对象为数字信号。本书的重点是研究离散时间信号与系统。在这一章中，将介绍离散时间信号与系统的基础理论知识，定义了离散时间信号的表示方式——序列，以及一些常用的时间序列和信号处理中的常用的运算，建立了离散系统的概念以及离散系统的一些性质，介绍了离散系统的表示方式、信号的数字化处理以及系统的频率响应。

1.1　离散时间信号——序列

1.1.1　序列的定义与表示

在数字信号处理中，信号是用数字序列来表示的。序列(Sequence)是一组以序列号为自变量的有序数字的集合，表示了在对应的离散时间点上的信号样本值。

通过对模拟信号在时域进行等时间间隔采样，可以获得时间量化的离散时间信号 $x(nT)$。$x(nT)$是一个有序的数字序列，其中，T 为采样周期，n 表示样点先后顺序。为了简化书写，采样周期 T 可以省略，直接表示为 $x(n)$，即序列 $x(n)$。

序列是离散时间信号在数学上的表示，其表示形式有两种，即集合或函数的表示形式以及序列图表示形式。

1. 集合或函数的表示形式

一个序列可以采用集合或函数的形式来表示，记作序列

$$x = \{x(n)\} = \{x(-\infty),\cdots,x(-1),x(0),x(1),\cdots,x(\infty)\},\ -\infty < n < \infty \tag{1-1}$$

式中：n 表示序列号，n 只能取整数，即 $n \in \boldsymbol{Z}$。

需要说明一点，序列号 n 强调的是数的先后顺序，而淡化顺序所表示的物理意义。$x(n)$表示第 n 项的序列值。序列 $x(n)$可以表示时间序列，也可以表示频域以及其他域上的一组有序数。x 为序列名称，不同的序列用名称加以区分，如 $x(n)$序列、$y(n)$序列等。在序列表示时，序列名称、序列号以及序列值三个要素缺一不可，例如，$x(n)=\{1,2,3,4\}$，$-2<n<3$，即 $x(-1)=1$，$x(0)=2$，$x(1)=3$，$x(2)=4$，也可以表示成 $x(n)=\{1,\underset{\substack{\uparrow \\ n=0}}{2},3,4\}$。

如果序列值与序列号之间具有一定的运算关系或规律，序列可以用函数的形式来表示。例如，序列 $x(n)=\{1,2,3,4\}$，$-2<n<3$ 可以用函数表示形式写成 $x(n)=n+2$，$-2<n<3$。

序列的函数表示形式给出了序列表示的闭合形式。

2. 序列图表示形式

序列图是一种直观、形象的序列表示方式。序列图可以以直角坐标系形式给出序列。例如，序列 $x(n)=\{1,2,3,4\}$，$-2<n<3$ 的序列图，如图 1-1 所示。其中横坐标表示序列号 n，n 只在整数值时才有意义，在非整数时无意义，而并非为零值；纵坐标表示序列 $x(n)$，用有限长度的线段表示对应序列号 n 的序列值的大小。序列图也可以采用数轴的形式来简单的表示序列，如图 1-2 所示。

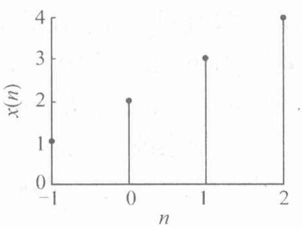

图 1-1　坐标形式的序列图

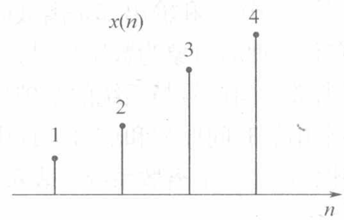

图 1-2　数轴形式的序列图

1.1.2　一些常用的时间序列

在研究离散时间信号与系统理论时，一些常用的序列是非常重要的。

1. 单位冲激序列

单位冲激序列(Unit Sample Sequence)也称为单位采样序列或脉冲序列，其定义为

$$\delta(x)=\begin{cases}1, n=0\\0, n\neq 0\end{cases} \tag{1-2}$$

单位冲激序列类似于模拟信号中的单位冲激函数 $\delta(t)$。单位冲激信号 $\delta(t)$ 是建立在积分定义上的，即 $\int_{-\infty}^{\infty}\delta(t)\mathrm{d}t=1$。$\delta(t)$ 是不可实现的数学极限，而 $\delta(n)$ 是可实现的。单位冲激序列和单位冲激信号如图 1-3 所示。

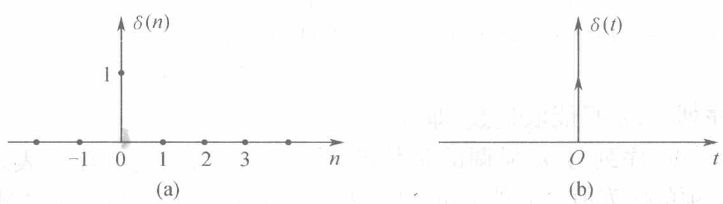

图 1-3　单位冲激序列和单位冲激信号

(a) 单位冲激序列；(b) 单位冲激信号。

单位冲激序列在离散信号与系统的分析与综合中有着重要的作用。将单位冲激序列平移 m 个单位，可以表示为

$$\delta(n-m)=\begin{cases}1, n=m\\0, n\neq m\end{cases} \tag{1-3}$$

这样,任意的序列都可以表示成为单位冲激序列移位加权和的形式,即

$$x(n)=\sum_{m=-\infty}^{\infty}x(m)\delta(n-m) \tag{1-4}$$

例如,序列如图 1-4 所示。

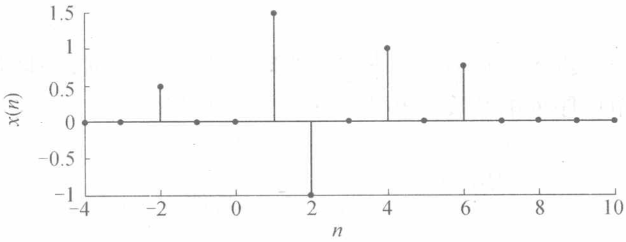

图 1-4　单位冲激序列表示任意序列

可以采用单位冲激序列 $\delta(n)$来表示,即

$$x(n)=0.5\delta(n+2)+1.5\delta(n-1)-\delta(n-2)+\delta(n-4)+0.75\delta(n-6)$$

因此,在说明某些离散时间系统(线性移不变系统)特性的时候,可以利用单位冲激序列作用系统时系统的输出响应序列,即单位冲激响应来完全描述,进而可以得到任意序列输入下系统的输出,可见,单位冲激序列在离散系统的研究中具有重要的意义。

2. 单位阶跃序列

单位阶跃序列(Unit Ste Psequence)定义为

$$u(n)=\begin{cases}1, n\geqslant 0\\0, n<0\end{cases} \tag{1-5}$$

单位阶跃序列如图 1-5 所示。

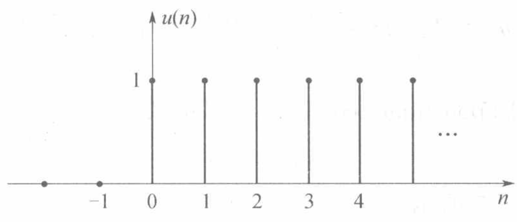

图 1-5　单位阶跃序列

单位阶跃序列 $u(n)$可以看作一组延迟的单位冲激序列之和,即

$$u(n)=\delta(n)+\delta(n-1)+\delta(n-2)+\cdots \tag{1-6}$$

或者

$$u(n)=\sum_{k=0}^{\infty}\delta(n-k) \tag{1-7}$$

单位阶跃序列也可以表示为

$$u(n) = \sum_{k=-\infty}^{n} \delta(k) \tag{1-8}$$

可见,单位阶跃序列 $u(n)$相当于单位冲激序列的累加和序列。同样,单位冲激序列也可以用单位阶跃序列来表示

$$\delta(n) = u(n) - u(n-1) \tag{1-9}$$

即单位冲激序列是单位阶跃序列的一阶向后差分。

3. 矩形序列

矩形序列(Rectangle Sequence)也是信号处理中常用的序列,一般用 $R_N(n)$表示,其中下脚标 N 表示矩形序列的长度。矩形序列 $R_N(n)$定义为

$$R_N(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leqslant n \leqslant N-1 \\ 0, & 其他 \end{cases} \tag{1-10}$$

矩形序列如图 1-6 所示。

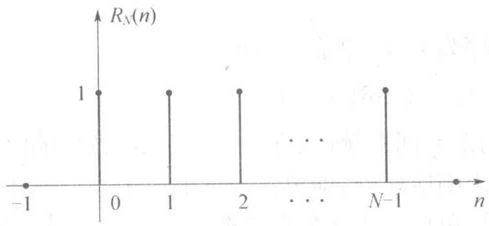

图 1-6　矩形序列

矩形序列 $R_N(n)$可以采用单位冲激序列和单位阶跃序列表示,即

$$R_N(n) = u(n) - u(n-N) = \sum_{m=0}^{N-1} \delta(n-m) \tag{1-11}$$

在序列的表示中,经常采用矩形序列来表示一个序列的序列号 n 的取值范围。例如,一个序列 $x(n)=2n$, $-1<n<4$,可以利用矩形序列表示为 $x(n)=2nR_4(n)$。

4. 实指数序列

实指数序列(Real Exponential Sequence)可以定义为

$$x(n) = a^n u(n) \tag{1-12}$$

实指数序列如图 1-7 所示。

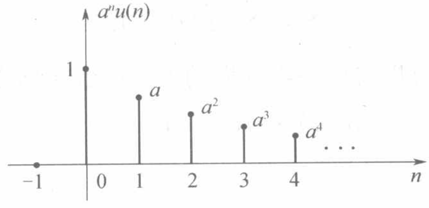

图 1-7　实指数序列

随着 a 取值不同,实指数序列呈现四种状态,具体如图 1-8 所示。

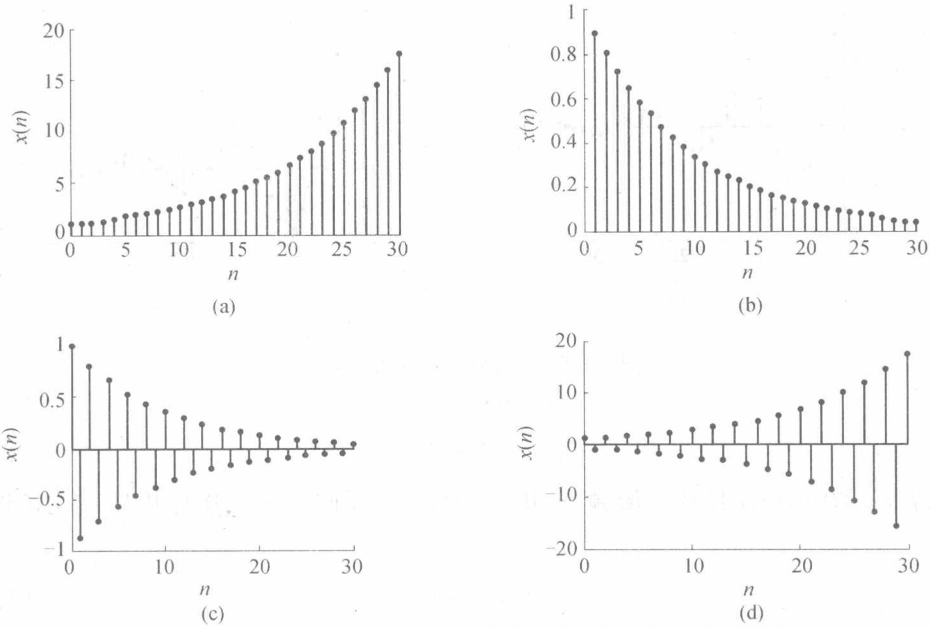

图 1-8 实指数序列的四种状态

(a) $a=1.1$; (b) $a=0.9$; (c) $a=-0.9$; (d) $a=-1.1$。

若$|a|>1$,则序列发散;若$|a|<1$,则序列收敛;若 $a<0$,则序列值表现为正、负交替的形式。

5. 复指数序列

复指数序列(Complex Number Exponential Sequence)表示为

$$x(n) = A\mathrm{e}^{(\sigma+\mathrm{j}\omega_0)n} \tag{1-13}$$

由欧拉公式可知,复指数序列可以表示为

$$\begin{aligned} x(n) &= A\mathrm{e}^{(\sigma+\mathrm{j}\omega_0)n} = A\mathrm{e}^{\sigma n}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_0 n} = A\mathrm{e}^{\sigma n}(\cos\omega_0 n + \mathrm{j}\sin\omega_0 n) \\ &= |x(n)| \arg[x(n)] \end{aligned} \tag{1-14}$$

式中:$|x(n)|=|A|\mathrm{e}^{\sigma n}$为信号序列的幅值;$\arg[x(n)]=\omega_0 n$ 为信号序列的幅角。

复指数序列也可以表示为实部和虚部的形式,即

$$\begin{aligned} x_{\mathrm{Re}}(n) &= |A|\mathrm{e}^{\sigma n}\cos(\omega_0 n + \phi) \\ x_{\mathrm{Im}}(n) &= |A|\mathrm{e}^{\sigma n}\sin(\omega_0 n + \phi) \end{aligned} \tag{1-15}$$

式中:$x_{\mathrm{Re}}(n)$为复指数序列的实部;$x_{\mathrm{Im}}(n)$为复指数序列的虚部。

例如,复指数序列 $x(n)=\exp\left(-\frac{1}{12}+\mathrm{j}\frac{\pi}{6}\right)n$ 的序列图如图 1-9 所示。

6. 正弦序列

正弦序列(Sinusoidal Sequence)是指序列值按正弦或余弦规律变化的序列。通常正弦序列可以表示为

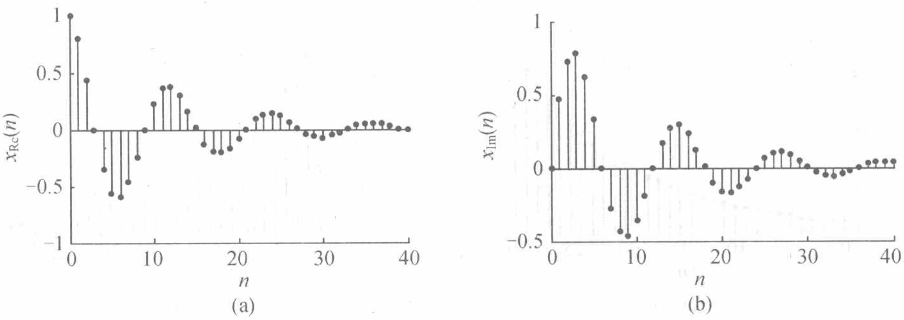

图 1－9　复指数序列的实部和虚部

(a) 实部；(b) 虚部。

$$x(n) = A\cos(n\omega_0 + \phi) \tag{1-16}$$

式中：ϕ 表示初相；ω_0 是数字域频率，单位为(rad)，反映序列按次序周期变化快慢的速率。

$$\omega_0 = 2\pi/N \tag{1-17}$$

式中：N 表示序列在一个周期内的采样点数。

正弦序列如图 1－10 所示。

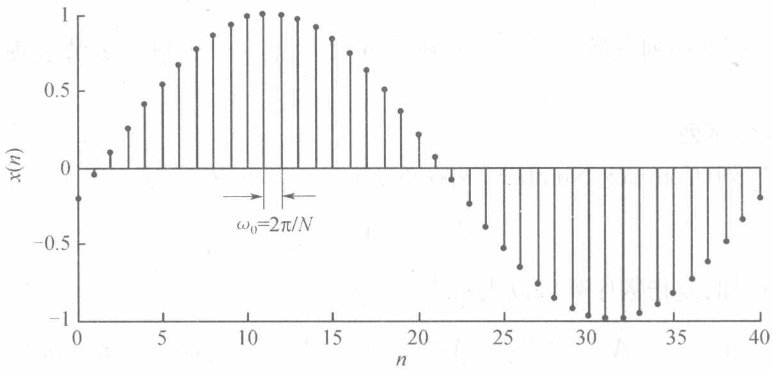

图 1－10　正弦序列

正弦序列也可以表示为

$$x(n) = A\cos(2\pi f n T_s + \phi) \tag{1-18}$$

式中：f 为频率，单位为 Hz。

若令 $\Omega = 2\pi f$，Ω 表示相对连续信号 $x(t)$ 的模拟角频率，单位为 rad/s。当频率 f 从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 变化时，模拟角频率 Ω 也是从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 变化。数字频率 ω_0 与实际频率 f 之间的关系为

$$\omega_0 = 2\pi f T_s = 2\pi f / f_s \tag{1-19}$$

式中：f_s 为采样频率。

当频率 f 从 0 变化到 f_s 时，ω_0 从 0 变化到 2π；当频率 f 从 0 变化到 $-f_s$ 时，ω_0 从 0

变化到 -2π。这样，频率 f 每变化 f_s，ω_0 变化 2π。

1.1.3 序列的运算

在离散时间信号与系统的分析与处理中，经常需要对信号进行操作，也就是对序列进行运算，常用的序列运算有序列的加法与乘法、移位与翻转、尺度变换、累加、差分、卷积和以及相关等。

1. 序列的加法与乘法

序列的加法与乘法是指两个或两个以上的序列对应序号的样点值相加或相乘的运算。

$y_1(n)=x_1(n)+x_2(n)$，$y_1(n)$就是两个序列 $x_1(n)$、$x_2(n)$对应项相加后得到的和序列。$y_2(n)=x_1(n)\cdot x_2(n)$，$y_2(n)$就是两个序列 $x_1(n)$、$x_2(n)$对应项相乘后得到的积序列。

例 1－1 利用 Matlab 实现下面两个序列的相加运算：

$$x_1(n)=[1,0.7,0.4,0.1,0,0.1],\ n=[1,2,3,4,5,6]$$
$$x_2(n)=[0.2,0.1,0.3,0.5,0.7,0.9,1],\ n=[2,3,4,5,6,7,8]$$

解：Matlab 实现程序如下：

```
n1=1:6;
x10=[1 0.7 0.4 0.1 0 0.1];
n2=2:8;
x20=[0.2 0.1 0.3 0.5 0.7 0.9 1];
n=1:8;
x1=[x10 zeros(1,8-length(n1))]; %对 x10 进行右侧补零
x2=[zeros(1,8-length(n2)) x20]; %对 x20 进行左侧补零
x=x1+x2
subplot(3,1,1);stem(n,x1,'.k');subplot(3,1,2);stem(n,x2,'.k');subplot(3,1,3);stem(n,x,'
.k');
```

计算结果为

x=1.0000 0.9000 0.5000 0.4000 0.5000 0.8000 0.9000 1.0000

结果如图 1－11 所示。

例 1－2 利用 Matlab 实现下面两个序列函数的相乘运算：$x(n)=e^n$，$y(n)=\sin(2\pi\times 5n)$。

解：Matlab 实现程序如下：

```
clear
n=[-10:1:10];
x=exp(n);
y=sin(2*pi*5*n);
z=x.*y;
subplot(3,1,1);stem(n,x,'.k');subplot(3,1,2);stem(n,y,'.k');subplot(3,1,3);stem(n,z,'.k')
```

结果如图 1－12 所示。

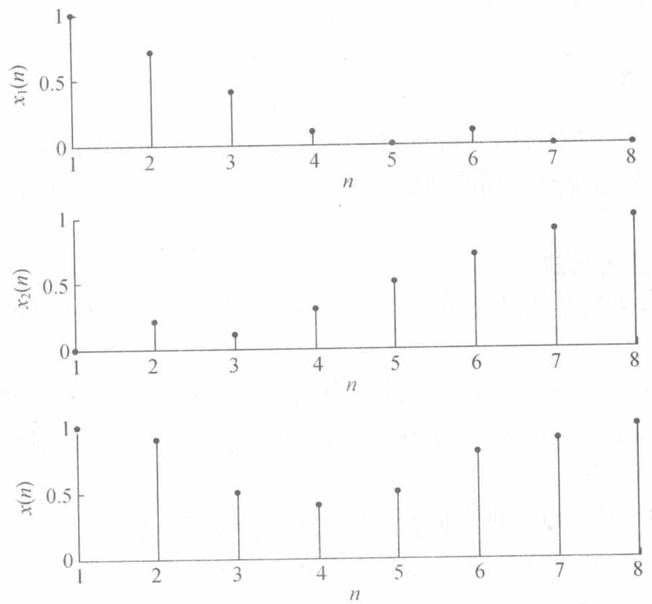

图 1－11　序列的加法

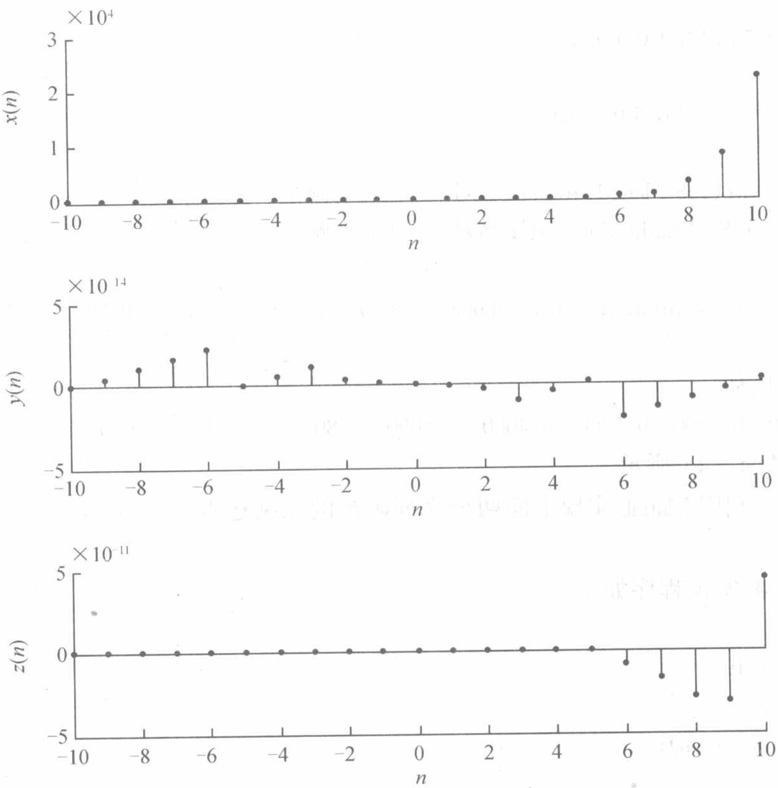

图 1－12　序列的乘法

2. 序列的移位

序列的移位也称作序列的延时，在数学上表示为

$$y(n) = x(n \pm m) \tag{1-20}$$

当 $m > 0$ 时，$x(n-m)$是序列 $x(n)$右移 m 位后的序列；$x(n+m)$是序列 $x(n)$左移 m 位后的序列。

例 1-3 设序列 $x(n)=[1,1,2,2,4,4,5,4,2,2,1]$，$n=[0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10]$。利用 Matlab 编程实现 $x(n)$的移位 $x(n+2)$和 $x(n-2)$。

解：Matlab 实现程序如下：

```
n=[0:10];
x=[1,1,2,2,4,4,5,4,2,2,1];
subplot(3,1,1);stem(n,x,'.k');axis([-3,13,0,5])
n1=n-2;
subplot(3,1,2);stem(n1,x,'.k');axis([-3,13,0,5])
n2=n+2;
subplot(3,1,3);stem(n2,x,'.k');axis([-3,13,0,5])
```

结果如图 1-13 所示。

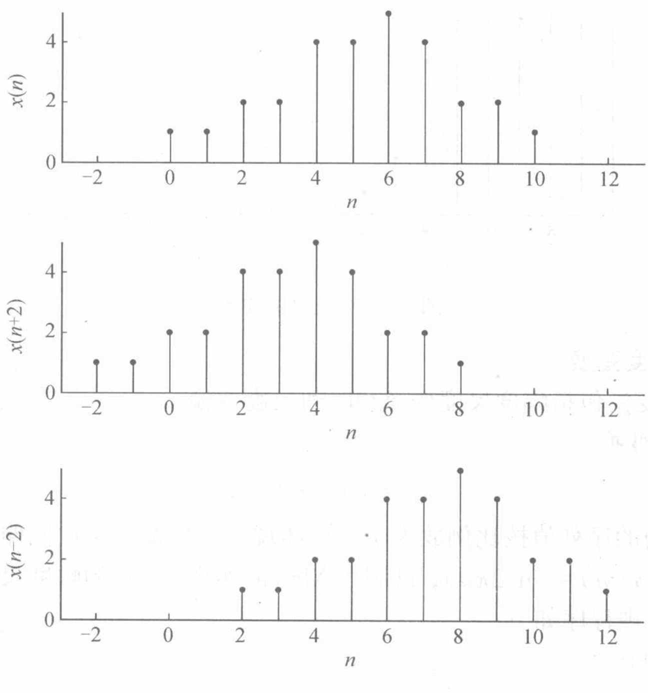

图 1-13　序列的移位

3. 序列的翻转

序列的翻转是以 $n=0$ 的纵轴为对称轴，将序列左右两边加以对调，即

$$y(n) = x(-n) \tag{1-21}$$

序列 $y(n)$就是 $x(n)$的翻转序列。