



普通高等教育创新型人才培养规划教材

实时数字信号处理实践方法

——从理论到实现

金靖 等编著



配有课件



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高等教育创新型人才培养规划教材

实时数字信号处理实践方法 ——从理论到实现

金 靖 等编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书介绍了实时数字信号处理系统设计和实现的相关理论、技术和方法。全书共9章,前4章介绍了实时数字信号处理应用基础及仿真方法,主要包括信号产生与操作、信号频谱分析技术、离散时间系统分析与实现、数字滤波器设计等;后5章介绍了实时数字信号处理系统设计与实现,包括系统组成、软硬件结构和控制、折衷设计、实时算法开发、系统实现的技术手段等。本书的重点是从信号处理理论到软硬件实现的映射过程和转换方法,并结合实际应用需求配有大量实例。

本书可作为电子、仪器、自动控制、光学等专业高年级本科生和研究生的教材或参考书,也可供相关研究人员和工程师使用。

图书在版编目(CIP)数据

实时数字信号处理实践方法:从理论到实现 / 金靖
等编著. -- 北京:北京航空航天大学出版社,2016.7
ISBN 978-7-5124-2173-8

I. ①实… II. ①金… III. ①数字信号处理 IV.
①TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第136482号

版权所有,侵权必究。

实时数字信号处理实践方法——从理论到实现

金 靖 等编著

责任编辑 孙兴芳

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(邮编100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京泽宇印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:14.75 字数:314千字

2016年8月第1版 2016年8月第1次印刷 印数:3 000册

ISBN 978-7-5124-2173-8 定价:35.00元

前 言

目前,国内关于数字信号处理的书籍基本分为两大类:一类是以 A·V·奥本海姆所著《离散时间信号处理》为代表的理论类书籍,该类书籍重点讲解信号处理理论的物理概念和数学描述,具有系统、严谨的理论体系;另一类主要讲解与信号处理相关的硬件和软件工具,如 DSP、FPGA、ARM、MCU 芯片应用和 C 语言、汇编语言、硬件描述语言以及 MATLAB 软件等。但是,在实际的信号处理系统设计和实现过程中,并不能完全将系统功能和理论算法直接对应到硬件和软件工具中,很多情况下需要对系统功能和算法进行优化、简化、转换和重新配置,仅仅这两类书籍是无法覆盖全过程的。本书正是根据以上现状,在对数字信号处理基础理论进行凝练、总结和归类的基础上,重点介绍了将信号处理理论映射到软硬件工具中的通用方法和技术,较为系统和全面地论述了实时数字信号处理系统的设计和实现方法,在信号处理理论和实现工具之间架设了一座桥梁,并能够给已经学习过基础理论的高年级本科生、研究生、相关研究人员和工程师的科研实践工作提供必要和有效的指导。为了突出实践性和技术特点,本书针对提炼出的各种通用技术和方法都配备了相应的例子加以说明。

本书较系统地介绍了实时数字信号处理系统设计和实现的相关理论、技术和方法,总结和凝练了从系统功能和算法理论映射到实现工具过程中所涉及的系统 and 算法仿真、优化、折衷、简化、分解、映射等重要方法,针对性和应用性强。全书共 9 章,前 4 章介绍了实时数字信号处理应用基础及仿真方法,主要包括信号产生与操作、信号频谱分析技术、离散时间系统分析与实现、数字滤波器设计等;后 5 章介绍了实时数字信号处理系统设计与实现,包括系统组成、软硬件结构和控制、折衷设计、实时算法开发、系统实现技术等。

该书的受众目标是高年级本科生、研究生、相关研究人员和工程师,假设读者已经具备高等数学、线性代数、概率统计、信号与系统、数字电路和计算机原理的初步知识。所以,内容并不拘泥于完整的基础理论体系和详细的公式推导,而是通过大量的实例来强调理论和公式的应用,从应用中归纳、总结和提炼方法,并初步训练读者使用信号处理工具的能力。

本书由北京航空航天的金靖、潘雄、李慧、宋镜明、孔令海和任聪编写,其中,第 1 章由宋镜明编写,第 2、5、6、7、8、9 章由金靖编写,第 3 章由潘雄编写,第 4 章由李慧编写,全书的仿真实例由孔令海和任聪编写,金靖负责全书的统稿工作。

在本书的编写过程中,邀请了北京航空航天大学的张春熹教授和宋凝芳教授审阅本书,他们对书中内容提出了宝贵的意见,并对该书的出版给予了热情的支持和帮助,在此表示衷心感谢;同时,感谢研究生王庆涛、李亚、张婷、张浩石、张丁对本书进行细致的校验,感谢北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院对本书出版给予的大力支持。

由于作者水平有限,书中尚存缺点和遗漏之处,恳请读者提出宝贵意见和建议,以帮助作者提高水平和进一步完善本书。

作者
2016年2月

目 录

第 1 章 离散时间信号	1
1.1 信号的概念及分类	1
1.2 基本离散时间信号的表示	5
1.3 典型离散随机信号的表示	12
1.4 离散时间信号的基本运算和操作	19
第 2 章 离散傅里叶变换和 Z 变换	30
2.1 离散傅里叶变换	30
2.2 进行频谱分析的注意事项	39
2.3 频谱分析实例	44
2.4 Z 变换概述	46
第 3 章 离散时间系统	49
3.1 离散时间系统的概念和性质	49
3.2 离散时间系统的模型	50
3.3 离散时间系统的结构、分析与实现	56
第 4 章 数字滤波器设计	68
4.1 概 述	68
4.2 IIR 滤波器设计	70
4.3 FIR 滤波器设计	80
第 5 章 实时数字信号处理系统概述	93
5.1 实时数字信号处理系统的特点	93
5.2 实时数字信号处理系统的基本组成	94
5.3 实时数字信号处理系统的数字表示法	102
第 6 章 实时数字信号处理系统的软件和硬件结构	115
6.1 实时数字信号处理系统的通用软件结构	115
6.2 硬件描述语言中的典型软件结构	121

6.3	实时数字信号处理器的一般硬件结构	126
6.4	FPGA 的基本硬件结构	129
6.5	实时数字信号处理系统中的多处理器结构	132
6.6	数字信号处理器系统的控制	137
第 7 章	实时数字信号处理系统的折衷设计	142
7.1	折衷设计方法	142
7.2	软件和硬件折衷	143
7.3	软件的时间和空间折衷	147
7.4	硬件的时间和空间折衷	157
7.5	其他类型折衷	166
第 8 章	实时数字信号处理算法的开发	173
8.1	实时数字信号处理算法的概念和性能分析	173
8.2	实时数字信号处理算法的设计和描述	182
8.3	实时数字信号处理算法实现的基本步骤	187
第 9 章	实时数字信号处理系统实现的技术手段	191
9.1	输入数据的简化处理	191
9.2	算法的优化和简化	192
9.3	算法的转化和移植	202
9.4	算法的分解	208
9.5	软硬件联合设计	215
9.6	通信优化设计	218
9.7	测试和验证方法	222
参考文献	225

第 1 章 离散时间信号

1.1 信号的概念及分类

信号是指消息的表现形式,既可以是带有信息的某种物理量,也可以是一个数学函数。如果将信号表示为 $x(t)$,则因变量 x 即是信号的幅值,其可以代表不同的物理量,如电流、光强、波长、压力、转速等;自变量 t 也称信号的域,很多场合下都代表时间,则信号 $x(t)$ 被称为时间信号或时域信号,但 t 也可能是频率、空间、温度等变量,相对应的则是频域信号、空间域信号和温度域信号等。在本书中,不做特殊说明时,均把 $x(t)$ 视为时域信号。

图 1.1(a)所示是一个超辐射发光二极管输出光的中心波长随时间变化的情况,该信号的因变量是波长,自变量是时间,因此,该信号是一个时域波长信号;图 1.1(b)所示是相同时间段内该超辐射发光二极管所处温箱内的温度随时间变化的波形,该信号的因变量代表温度,自变量同样为时间,因此,该信号为时域温度信号。对比图 1.1(a)和图 1.1(b)可知,波长和温度有着十分明显的相关性,相比波长在时间域的表现,我们更关心波长与温度间的数学关系和物理内涵。将波长作为因变量(信号的幅值)、温度作为自变量(信号的域),可以得到一个温度域内的波长信号,如图 1.1(c)所示。

根据信号的特点、性质、表达方式以及研究角度等,可将信号分为下列常见类型。

1. 连续信号、离散抽样信号和数字信号

连续信号是指域和幅值都连续的信号,记为 $x(t)$ 。若该信号的域 t 为时间,则称 $x(t)$ 为连续时间信号。

只有信号的域被离散和量化了的信号才称为离散抽样信号,记为 $x(nT_s)$ (其中, T_s 为抽样周期, n 取整数),一般可以简化为 $x(n)$ 。特别地,当信号 $x(nT_s)$ 的自变量为时间时,离散抽样信号又称为离散时间信号, $x(n)$ 也称为离散时间序列。

若信号的域和幅值都被离散和量化了,则该信号为数字信号。连续信号数字化的过程如图 1.2 所示。

在信号处理过程中,进行数学公式推导和演算时可用连续信号。使用 C 语言和 MATLAB 程序等在计算机中仿真时,因为数据字长较长,信号幅值的量化精度很高,可近似认为信号是幅值连续的离散抽样信号或离散时间信号,本书的前 4 章将主要关注离散时间信号。在实时数字信号处理系统中,使用了模/数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)、现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array,

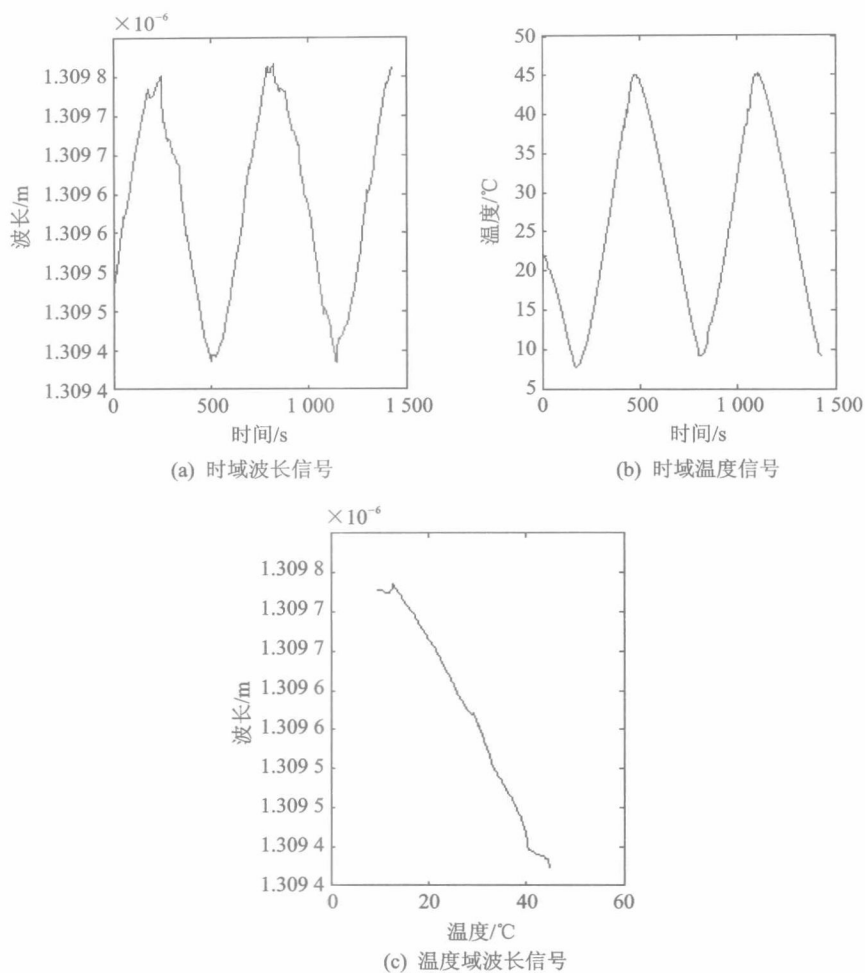


图 1.1 不同域的信号举例

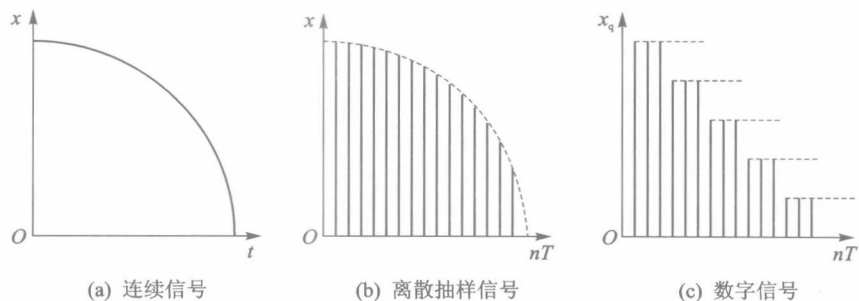


图 1.2 连续信号数字化

FPGA)和数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)等数字化器件,要求所处理信号的域和幅值均量化,即数字信号,本书后续关于实时数字信号处理系统设计和实现的内容将主要涉及数字信号。

2. 确定性信号和随机信号

如果信号能够用明确的数学关系来描述,并能利用该数学关系精确地确定或预测信号的值,则该信号为确定性信号。相反,随机信号的取值是不可精确确定和预测的,其因变量和自变量缺乏明确的数学关系表述,只能用统计学的方法描述其平均特性。

光电探测器组件(包括光电转换器和跨阻抗放大器)的输出噪声是典型的随机信号,我们无法精确确定和预测其取值,只能确定其均值、方差等统计特性。图 1.3 所示为在相同实验条件下独立地多次重复测试光电探测器组件输出噪声的实验结果。

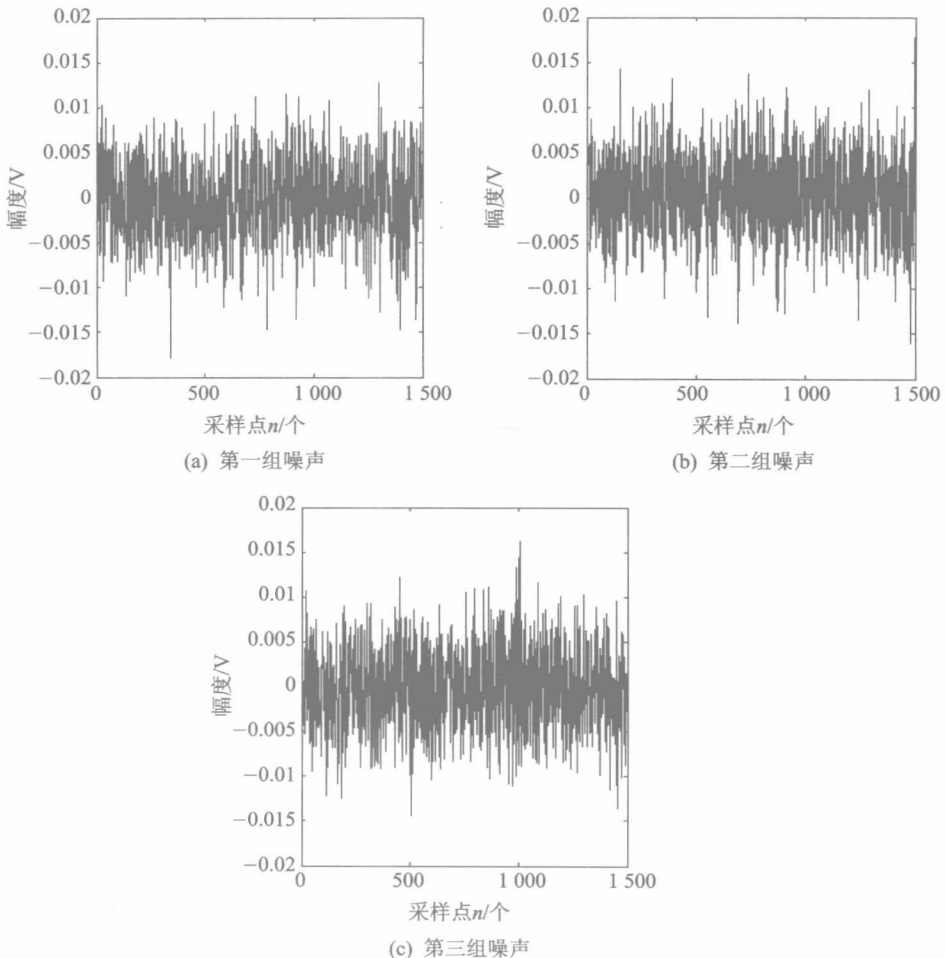


图 1.3 光电探测器组件的输出噪声

在实际工作中,很难得到理想的确定性信号,各种物理过程总是伴随着随机因素,信号的产生和测量也都不可避免地包含各种随机过程。因此,我们得到的数据往往是理想确定性信号和随机信号的某种组合。判断实际数据是否为确定性的一个实践标准是,能否通过可控的实验重复这个数据。在相同条件下独立地重复多次产生特定数据的实验,如果产生的所有结果都相同或其差异在实验误差允许的范围内,那么该数据就被认为是确定性的。

对于一个正弦信号 $x(t) = \sin(2\pi ft + \varphi)$,确定了频率 f 和相位 φ 后,该信号就是严格的确定性信号。但在实际电路中,给定的频率 f_0 和相位 φ_0 均伴随着微小的随机波动。例如,考虑相位有随机波动时,正弦信号可以表示为 $x(t) = \sin[2\pi f_0 t + \varphi_0 + \Delta\varphi(t)]$,其中, $\Delta\varphi(t)$ 是服从某种概率分布的随机信号。如果 $\Delta\varphi(t)$ 的波动足够小,就可以较精确地确定 $x(t)$ 的值,那么近似认为信号 $x(t)$ 是确定性的;如果 $\Delta\varphi(t)$ 的波动较大,信号 $x(t)$ 的相位带有明显的随机性,无法较精确地确定 $x(t)$ 的值,那么就认为 $x(t)$ 是随机信号。两种情况如图 1.4 所示,实线为确定性正弦波,虚线为带有相位随机波动的正弦波。

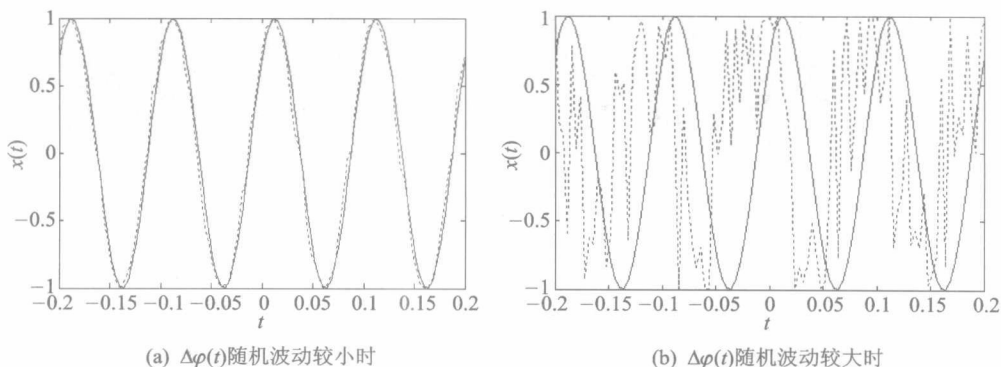


图 1.4 相位随机波动对确定性正弦信号的影响

随机信号包括平稳随机信号和非平稳随机信号,平稳随机信号还可进一步分为各态遍历信号和非各态遍历信号。

3. 周期信号和非周期信号

对于所有的 t 和 n ,如果有

$$x(t) = x(t + T) \quad (1.1)$$

$$x(n) = x(n + N) \quad (1.2)$$

式中: T 表示周期; N 为整数,表示周期,则称 $x(t)$ 和 $x(n)$ 为周期信号,否则称为非周期信号。1.2 节将给出典型周期信号和非周期信号。

4. 持续期有限信号和持续期无限信号

信号 $x(t)$ 和 $x(n)$ 满足下列条件:

$$x(t) = 0, \quad |t| > T \quad (1.3)$$

$$x(n) = 0, \quad n < N_1 \text{ 或 } n > N_2 \quad (1.4)$$

式中: T 为正数, N_1 和 N_2 为整数且 $N_2 \geq N_1$, 则称信号 $x(t)$ 和 $x(n)$ 为持续期有限信号; 当 $T = \infty$, $N_1 = -\infty$ 或 $N_2 = \infty$ 时, 称信号 $x(t)$ 和 $x(n)$ 为持续期无限信号。

5. 能量信号和功率信号

信号 $x(t)$ 和 $x(n)$ 的总能量或能量为

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt \quad (1.5)$$

$$E = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n)|^2 \quad (1.6)$$

信号 $x(t)$ 和 $x(n)$ 的平均功率或功率为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |x(t)|^2 dt \quad (1.7)$$

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N |x(n)|^2 \quad (1.8)$$

能量有限信号, 即 $0 < E < \infty$, 称为能量信号; 功率有限信号, 即 $0 < P < \infty$, 称为功率信号。对于理想的周期信号和随机信号, 由于其持续时间是无限长的, 其能量是无限的, 所以可以从功率角度对其进行分析。

1.2 基本离散时间信号的表示

下面介绍一些常用的基本离散时间信号, 并且介绍它们在 MATLAB 软件中是如何产生的。

1. 单位抽样序列

单位抽样序列又称为单位冲激序列, 定义为

$$\delta(n) = \begin{cases} 1, & n = 1 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases} \quad (1.9)$$

在 MATLAB 中, 可以用 `zeros` 函数产生该信号, 即

```
% ***** 生成一个总长度为 count 的单位抽样序列 *****%
t = -10:1:10; % 序列位置向量点
count = length(t); % 序列总长度
a = zeros(1, count); % 产生一个全 0 序列
a(fix(count/2) + 1) = 1; % 将对称中心值赋为 1, 即 t = 0 时 a = 1
stem(t, a, '.k'); % 作图
```

单位抽样序列如图 1.5 所示。

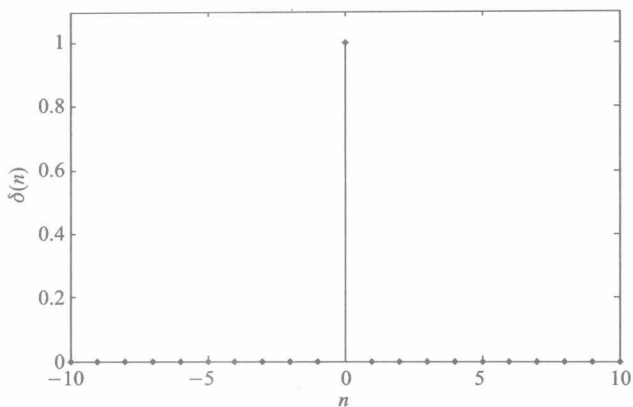


图 1.5 单位抽样序列

2. 单位阶跃序列

$$u(n) = \begin{cases} 1, & n \geq 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases} \quad (1.10)$$

在 MATLAB 中, 可以用 ones 函数产生该信号, 即

```
% ***** 生成一个总长度为 count 的单位阶跃序列 *****%
n = -20:1:20; % 序列位置向量点
count = length(n); % 序列总长度
a = zeros(1,fix(count/2)); % 产生一个全 0 序列
b = ones(1,fix(count/2) + 1); % 产生一个全 1 序列
u = [a b]; % 拼成单位阶跃序列, n<0 时 u = 0, n≥0 时 u = 1
stem(t, a, 'k'); % 作图
```

单位阶跃序列如图 1.6 所示。

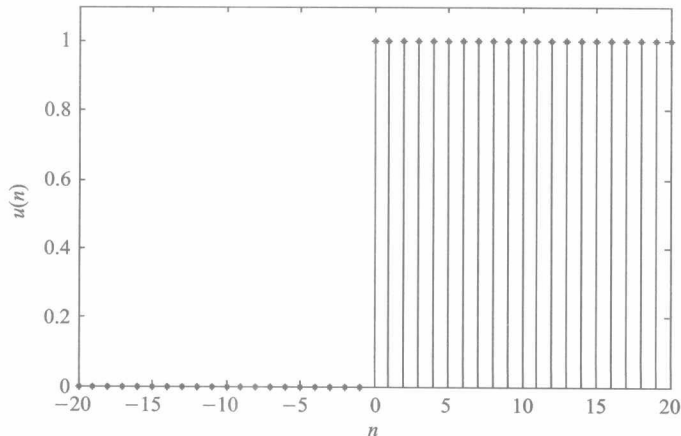


图 1.6 单位阶跃序列

3. 实指数序列

$$x(n) = a^n, \quad -\infty < n < \infty, a \in \mathbf{R} \quad (1.11)$$

在 MATLAB 中的产生方法如下:

```
% ***** 生成一个以 a 为底、总长度为 N 的指数序列 *****%
n = 1:N;
x = a.^n;          % 点阶乘,“.”^”是对向量或矩阵中元素进行阶乘运算
```

当输入参数 $a=0.9, N=20$ 时,有如图 1.7 所示的结果。

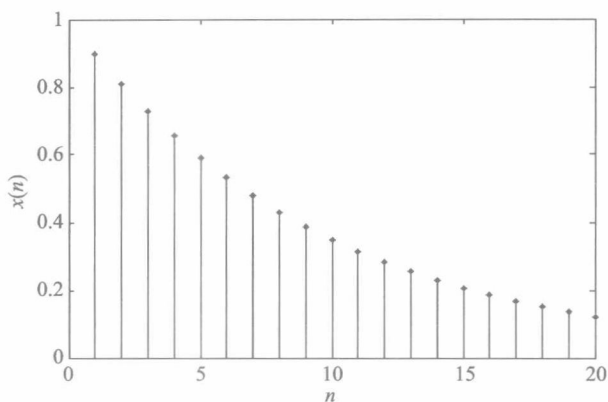


图 1.7 实指数序列

4. 复指数序列

$$x(n) = e^{(\sigma+j\omega)n}, \quad -\infty < n < \infty \quad (1.12)$$

在 MATLAB 中的产生方法如下:

```
% ***** 复指数序列 *****%
n = 1:N;          % N 表示生成序列的长度
x = exp(a * n);  % x 表示生成的复指数序列值, a 表示指数参数(应该为复数)
rea = real(x);   % rea 表示复指数序列的实部序列
ima = imag(x);   % ima 表示复指数序列的虚部序列
amp = abs(x);    % amp 表示复指数序列的幅度值序列
pha = angle(x);  % pha 表示复指数序列的相位值序列
```

当输入参数为 $a=-0.3+0.5 \times j, N=20$ 时,有如图 1.8 所示的结果。

5. 矩形脉冲序列

矩形脉冲序列可由两个单位阶跃序列组合产生,如下:

$$x(n) = A[u(n+k) - u(n-k)] \quad (1.13)$$

式中:脉冲幅度为 A ,脉冲宽度为 $2k$ 。一种在 MATLAB 中产生矩形脉冲序列的方法如下:

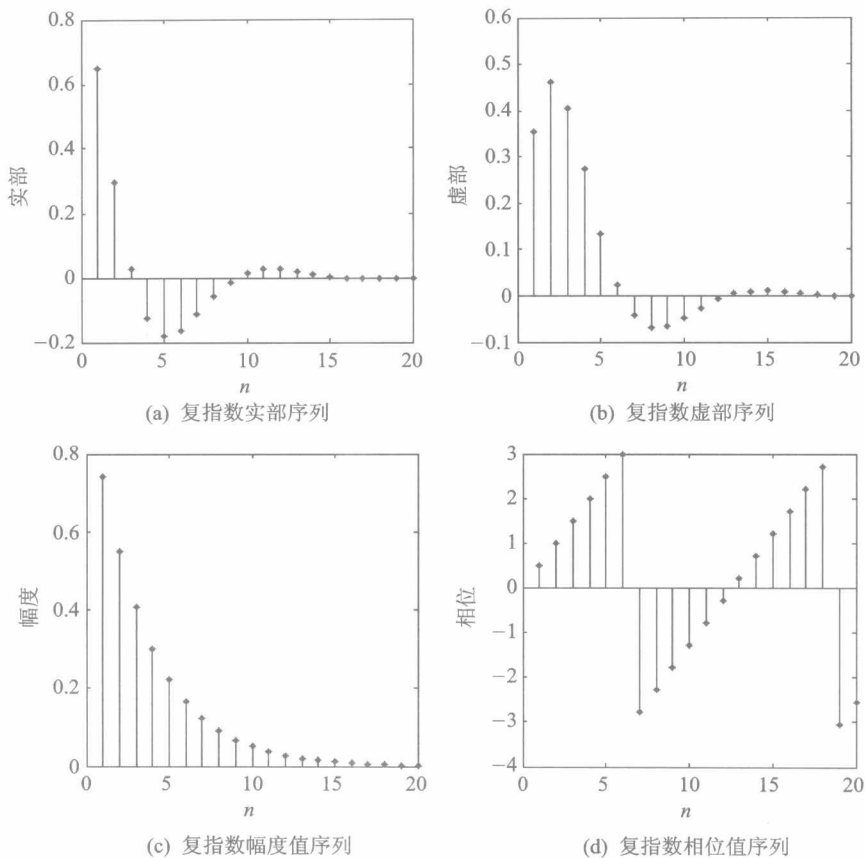


图 1.8 复指数序列

```

% ***** 生成一个宽度为 n 的矩形脉冲序列 *****
a1 = zeros(1,m-1);
b1 = ones(1,M-m+1);
u1 = [a1 b1];           % 延时为 m 个点的单位阶跃序列
a2 = zeros(1,m+n-1);
b2 = ones(1,M-m-n+1);
u2 = [a2 b2];           % 延时为 m+n 个点的单位阶跃序列
x = u1 - u2;             % 两个不同延时的单位阶跃序列相减得宽度为 n 的矩形脉冲序列

```

当输入参数 $m=5$, $n=4$, $M=10$ 时,生成起始点为 $m=5$ 、宽度为 $n=4$ 的矩形脉冲序列的过程如图 1.9 所示。

6. 正弦波序列

$$x(n) = A \sin(2\pi f T_s n + \varphi), \quad T_s = 1/f_s \quad (1.14)$$

$$x(n) = A \sin(\Omega T_s n + \varphi), \quad \Omega = 2\pi f \quad (1.15)$$

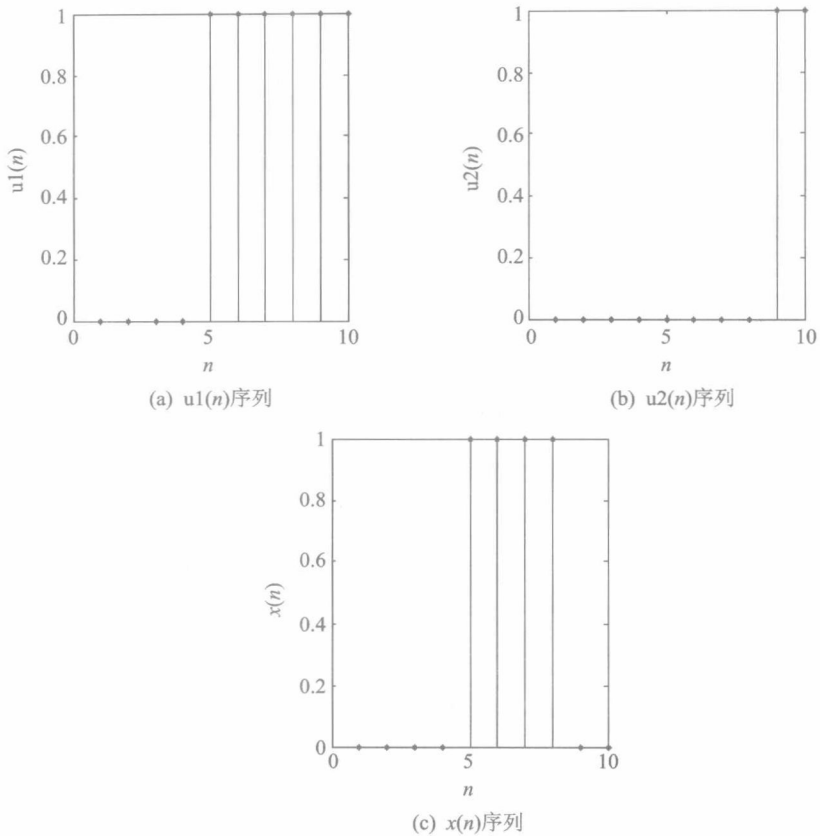


图 1.9 产生宽度为 4 的矩形脉冲序列

$$x(n) = A \sin(\omega n + \varphi), \quad \omega = 2\pi f T_s \quad (1.16)$$

正弦波序列可以表示成上述 3 种形式,其中, A 是信号幅值, T_s 为抽样周期, f_s 为抽样频率, φ 为信号相位, f 是信号频率(单位是 Hz), Ω 为模拟角频率(单位是 rad/s), ω 为数字角频率或圆频率(单位是 rad/s), ω 也表示 Z 平面的幅角或向量的相角。

在 MATLAB 中可用如下方法产生正弦波序列:

```
% ***** 生成序列总长度为 M 点的正弦波序列 ***** %
n = 0:M-1;           % M 是序列点数
t = n/fs;           % fs 为抽样频率, t 为采样点的时间值
x = A * sin(2 * pi * fo * t + ph); % fo 为信号频率, A 为正弦波幅值, ph 为初始相位
```

当输入参数 $M=64$, $A=1$, $ph=0$, $fo=10$, $fs=400$ 时,有如图 1.10 所示的结果。

7. 方波序列

在 MATLAB 中,可以用 square 函数方便地生成任意占空比的方波信号,例如:

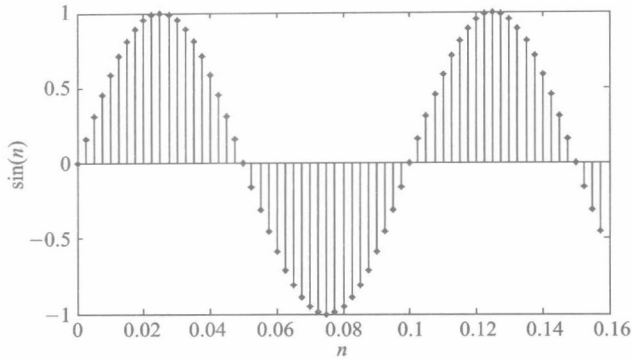


图 1.10 正弦波序列

```

% ***** 利用 square(t,duty)函数产生频率为 50 Hz、幅值为 ±1 的方波序列 ***** %
t = 0:0.001:0.05;           % 生成采样时间点
duty = 30;                   % 占空比为 30 %
f = 50;                       % 信号频率为 50 Hz
x = square(2 * pi * f * t, duty);

```

图 1.11 所示为方波序列。

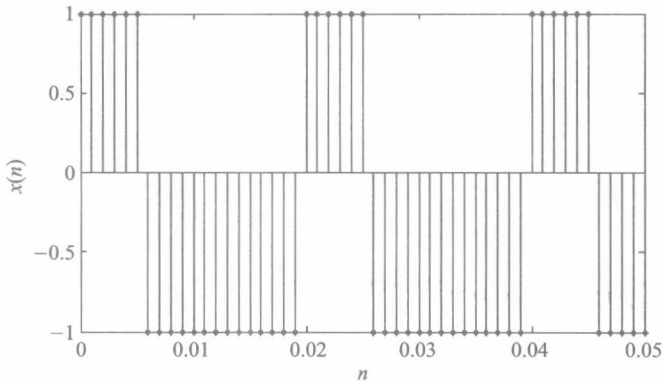


图 1.11 方波序列

此外,也可利用有限项的傅里叶级数来逼近周期信号。例如,对称方波信号的傅里叶级数展开表达式为

$$x(n) = \frac{2A}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin\left(\frac{k\pi}{2}\right) \cos[(k2\pi f)T_s n] \quad (1.17)$$

式中: A 为方波幅值, T_s 为抽样周期, f 为方波频率。

我们可以利用上式中的有限项来产生近似的对称方波信号。利用此种方法的 MATLAB 程序如下: