现代信号处理

Lecture 03

唐晓颖
电子与电气工程系
南方科技大学

September 16, 2025

二. 数字信号处理的优势:

（1） 精度高

（2） 可重复性强

（3） 体积小

（4） 成本低

（5） 可编程：所以灵活性强

（6） 实时性(Real-time)强

三. 数字信号处理的理论:

基础

- 数学: 微积分, 线性代数, 概率, 随机过程, 数论
- 信号与系统, 计算机

发展

- 现代通信原理、现代控制理论
- 模式识别、最优化、神经网络
- 系统辨识、 振动测试
- 生物医学工程

数字信号处理的理论非常丰富，且在不断的飞速发展中，如：

上个世纪的六十、七十年代

DFT， FFT， Z变换， Hilbert变换；

离散系统分析理论；

各种数字滤波器设计理论；

随机信号统计分析理论；

上个世纪的八十年代:

现代功率谱估计理论（AR， ARMA模型）；

自适应滤波理论;

时频联合分析（Wigner分布， Cohen类分布）；

滤波器组理论；高阶统计量理论;

上个世纪的九十年代：

小波变换理论；

独立分量分析理论（ICA）

这10年：

Hilbert – Huang变换；

压缩传感（compressed sensing）理论，

被誉为信号处理领域的“Next a big idea”

数字信号处理的理论
大体上可以分为：

（一）、经典信号处理

（二）、统计信号处理

（三）、现代信号处理

实现
应用

（一）．经典信号处理:

经典数字信号处理主要

围绕两大部分内容:

1. 有关信号;

2. 有关系统;

1. 有关信号

（1） 信号的描述：函数式；曲线；

（2） 特殊信号：冲激；阶跃；斜坡；正弦，指数；

（3） 信号的运算：加；减；乘；卷积；变换；

（4） 信号的分解：正交分解；

（5） 信号的抽样：抽样定理；

（6） 信号的重建：正交分解；

2、有关系统

（1）．离散时间系统的描述；

（2）．离散时间系统的属性；

线性；
移不变性；
因果性；
稳定性

（3）．离散时间系统的输入输出关系；

（4）．离散时间系统的分析

属性判别？
LP?HP?BP? BS?
线性相位？

（5）．离散时间系统设计

（数字滤波器设计）

IIR DF
FIR DF

二. 统计信号处理

1. 随机信号的描述

- 均值
- 方差
- 自相关函数
- 功率谱

2. 平稳及各态遍历信号

3. 估计问题

- 自相关函数估计
- 功率谱估计（经典，现代）

4. 最优滤波

- 维纳滤波器
- 线性预测
- 自适应滤波器
- 卡尔曼滤波器

三. 现代信号处理

1. 非平稳信号的联合时频分析
2. 多抽样率信号处理
3. 小波变换
4. HILBERT－HUANG变换
5. 独立分量分析（ICA）
6. 压缩传感理论（CS）

Wigner 分布
Cohen类分布

信号抽取
信号插值
两通道滤波器组
M通道滤波器组

四.数字信号处理的出现与实现

21世纪60年代	随着FFT等算法的出现，数字信号处理兴起
21世纪70年代	数字信号处理理论和算法研究发展，主要用于军事
21世纪80年代	DSP芯片推出并迅速发展，数字产品民用化
21世纪90年代	数字产品普及，价格逐年降低
21世纪以来	数字技术渗透到涉及信号处理各个领域和日常生活中，正改变着我们的生活

四.数字信号处理的出现与实现

软件实现:

（教学, 科研, 开发的前期）

- DSP 软件包
- MATLAB Signal Processing Tool Box

硬件实现:

- CPU, MCU,
- DSP

四.数字信号处理的出现与实现

数字信号处理常用算法

- 卷积 $$y(n)=\sum_{k} x(k)h(n-k)$$
- 傅里叶变换 $$X(k)=\sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi nk/N}$$

特点： 均为大量的“连乘连加” 运算

四.数字信号处理的出现与实现

数字信号处理常用硬件

- DSP
  - 实时性
  - 高性能
  - 低功耗设计
  - 可编程性
- FPGA
  - 低延迟
  - 高度并行化
  - 低功耗设计
  - 可编程性

五.数字信号处理的应用

➢数字化技术正改变着我们的生活——**生活用品数字化**

生活环境数字化

数字化医院

数字化农场

生活方式数字化

通信

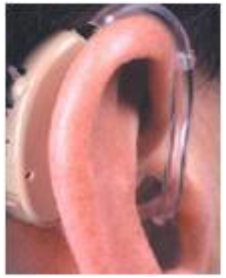
交通

购物

阅读

授课

DSP的应用



耳背式

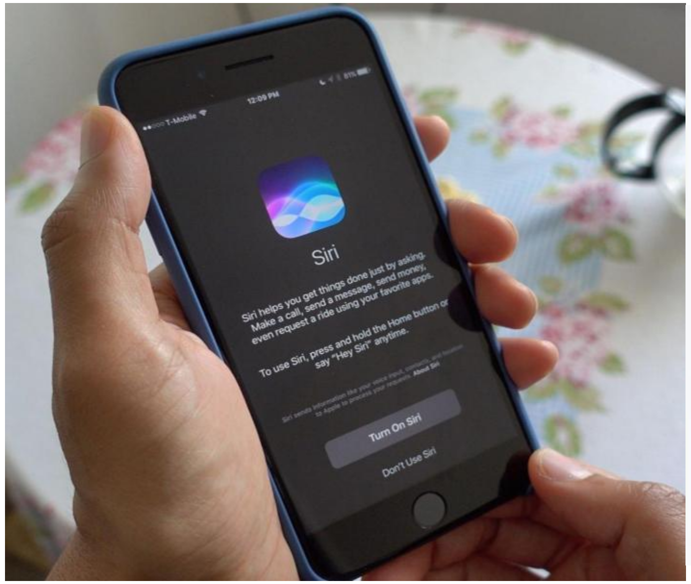
耳道式

耳内式

完全耳内式

心电 Holter

DSP的应用


Siri
Siri helps you get things done just by asking. Make a call, send a message, send money, even request a ride using your favorite apps.
To use Siri, press and hold the Home button or say "Hey Siri" anytime.
Turn On Siri
Don't Use Siri

小爱同学
小米AI音箱 语音助手命名记

华为小艺精灵

语音助手

FPGA的应用


外科机器人


内窥镜


CT、MRI、PET 成像


放射治疗


超声波


3D 牙科成像


病人监护仪


呼吸机与泵机


智能病床


除颤器

FPGA的应用

自动驾驶

五.关于数字信号处理的学习

作为一门课程，学好数字信号处理和学好其他课程有着共同的要求。下面是几点特殊的要求：

(1) 特别要注意加深概念的理解，不要只停留在死记数学公式上；

(2) 通过应用来加深理解和记忆；特别希望大家在学习的过程中一定要重视利用MATLAB和Python来完成实际的信号处理任务；

(3) 打好基础，循序渐进；

(4) 尽可能的多看一些国外的教科书及有关文献

参考书

[1] S J. Orfanids. Introduction to Signal Processing. 1996; 清华大学出版社， 1999

[2] S K Mitra. Digital Signal Processing: A Computer－ Based Approach . 2001, 清华大学出版社， 2001

[3] Proakis J.G. Introduction to Digital Signal Processing. 1988

有关期刊

1. I EEE Trans. on Signal Processing;
2. I EEE Trans. on Circuits and Systems;
3. I EEE Trans. on Biomedical Engineering;
4. Proc. of I EEE;
5. Signal Processing;
6. 信号处理

第1章 离散时间信号与离散时间系统基础

一、常用的离散时间信号;

二、信号的分类;

三、噪声;

四、信号空间;

五、离散时间系统;

六、 LSI系统输入、输出关系;

七、 LSI系统的频率响应;

八、确定性信号的相关函数

1.1 常用的离散时间信号

1.单位抽样信号:　　（Kronecker 函数）

$$\delta(n)=\begin{cases}1 & n=0\\ 0 & n\neq 0\end{cases}\qquad \delta(n-k)=\begin{cases}1 & n=k\\ 0 & n\neq k\end{cases}$$

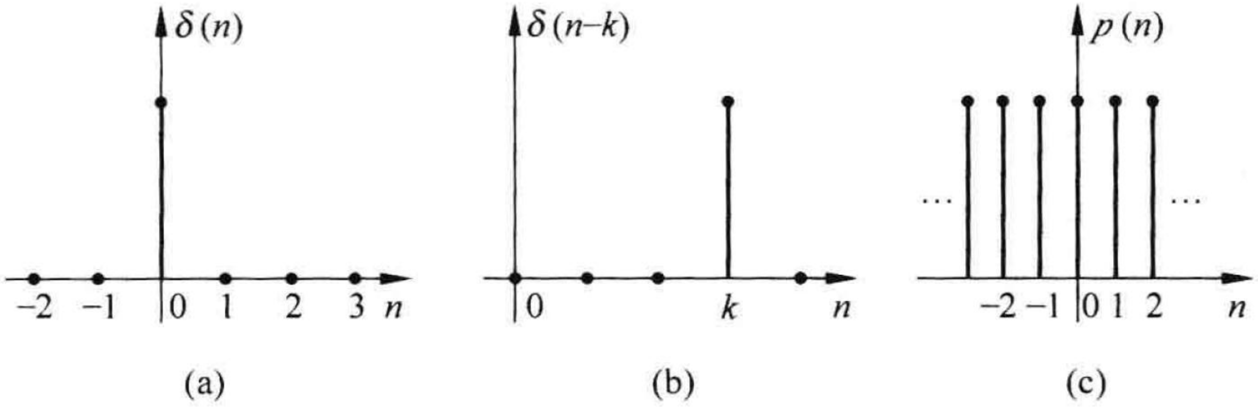


图 1.1.2　单位抽样信号及其移位

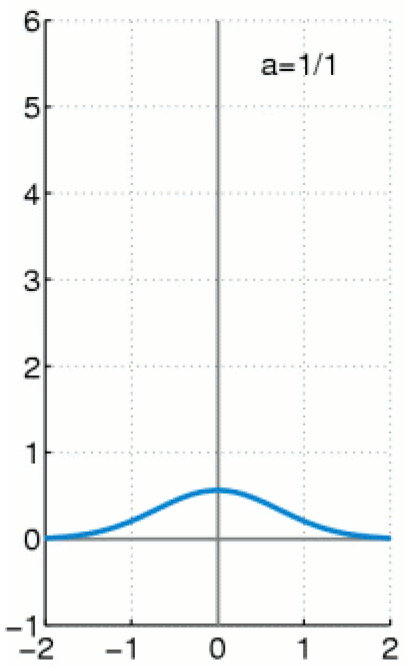
如何表达?

$$p(n)=\sum_{k=-\infty}^{\infty}\delta(n-k)$$

单位冲激信号（Dirac delta 函数）

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)dt = 1 \\ \delta(t) = 0, \quad t \neq 0 \end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t)\delta(t-\tau)dt = x(\tau)$$



狄拉克δ函数是以零为中心的正态分布$\delta_a(x) = \frac{1}{a\sqrt{\pi}}\mathrm{e}^{-x^2/a^2}$随$a \to 0$的（分布意义上的）极限。

在除零以外的点上都等于零，且其在整个定义域上的积分等于1。δ函数有时可看作是在原点处无限高、无限细，但是总面积为1的一个尖峰，在物理上代表了理想化的质点或点电荷的密度。

脉冲串： $p(n)=\sum_{k=-\infty}^{\infty}\delta(n-k)$

或写为 $p(n)=\{\cdots,1,1,1,\cdots\}$

冲激串： $p(t)=\sum_{k=-\infty}^{\infty}\delta(t-kT_s)$

$$x(nT_s)=x(t)p(t)=x(t)\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(t-nT_s)$$

将 nT_s 用 n 来替换

$$x(nT_s)\Rightarrow x(n)$$ → 离散序列

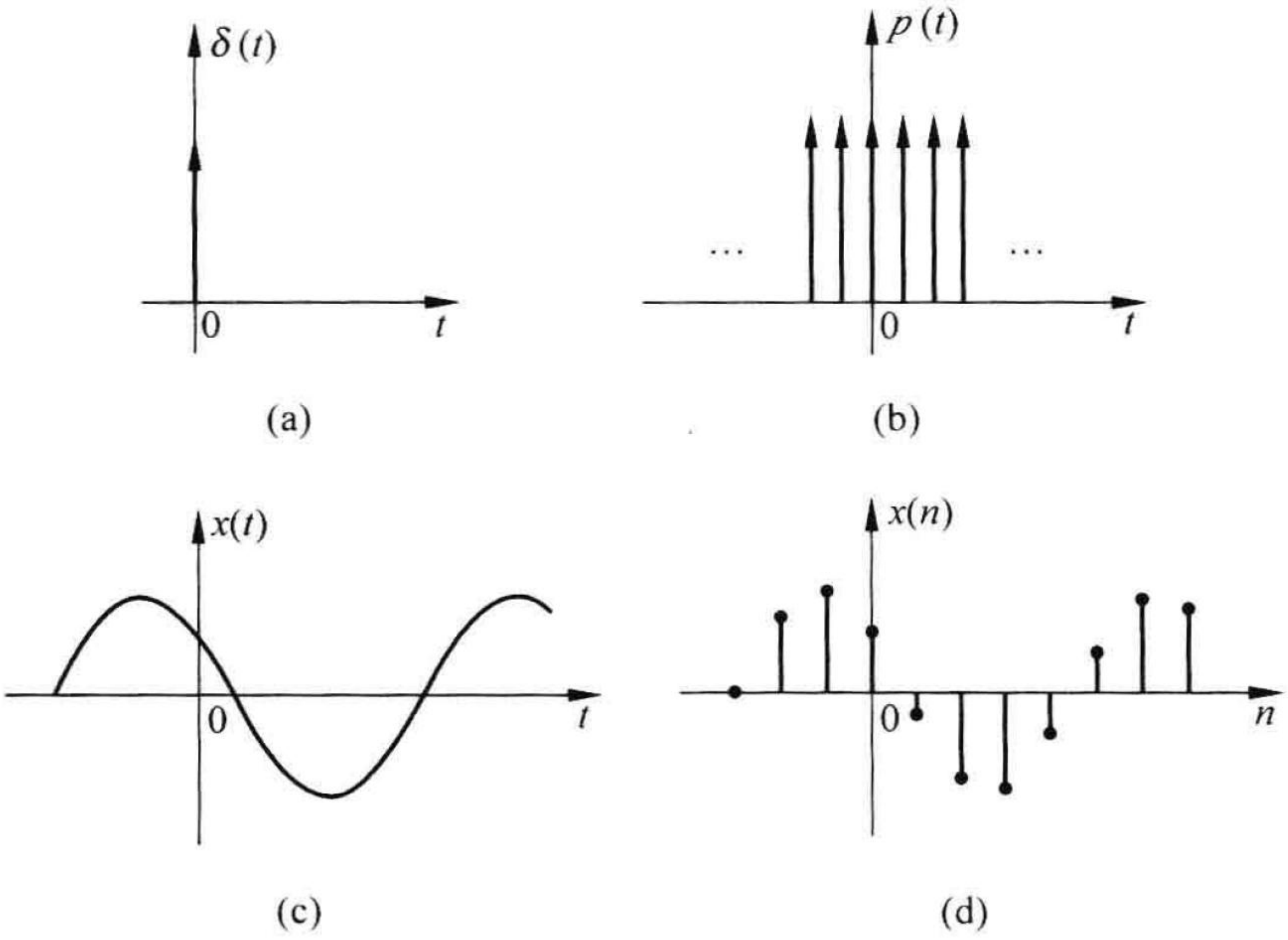


图 1.1.3　单位冲激信号及抽样示意图

2.正弦信号

$$x(t) = A\sin(2\pi f t + \varphi) = A\sin(\Omega t + \varphi)$$

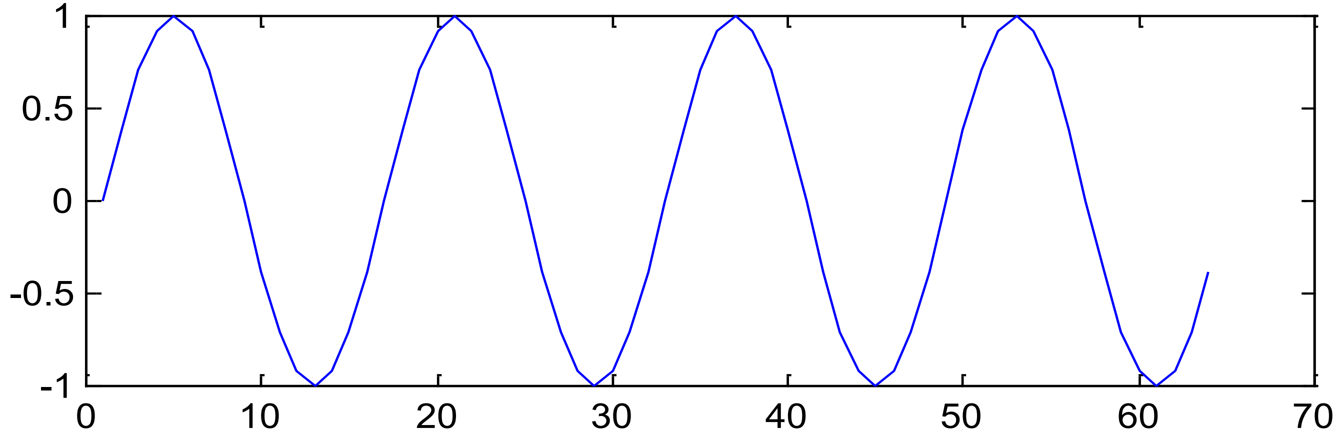
$$x(n) = x(t)\big|_{t=nT_s} = A\sin(2\pi fn / f_s + \varphi)$$

(f : Hz; Ω : rad/s; f_s : 抽样频率, Hz)

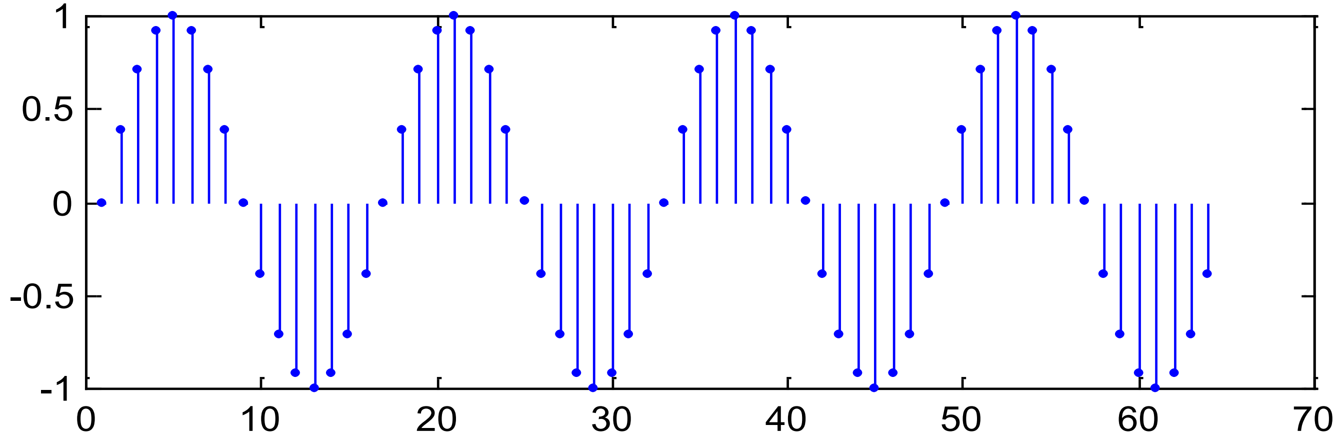
定义： $\omega = 2\pi f / f_s \quad (rad)$

$$x(n) = A\sin(\omega n + \varphi)$$

$x(t)$



$x(n)$



例: $x(t)=\sin(200\pi t)$

则 $f=100\,\mathrm{Hz}$ $T=0.01$

令 $f_s=400Hz$ 则:

$$x(n)=\sin(200\pi n/400)=\sin(0.5\pi n)$$

则周期 $N=4$

$$x(n)=\sin(\omega n) \qquad \omega = 2\pi / N$$

$$x(n)=\sin(0.01\pi n) \qquad 2\pi / N = 0.01\pi \Rightarrow N = 200$$

$$x(n)=\sin(0.1n) \qquad 2\pi / N = 0.1$$

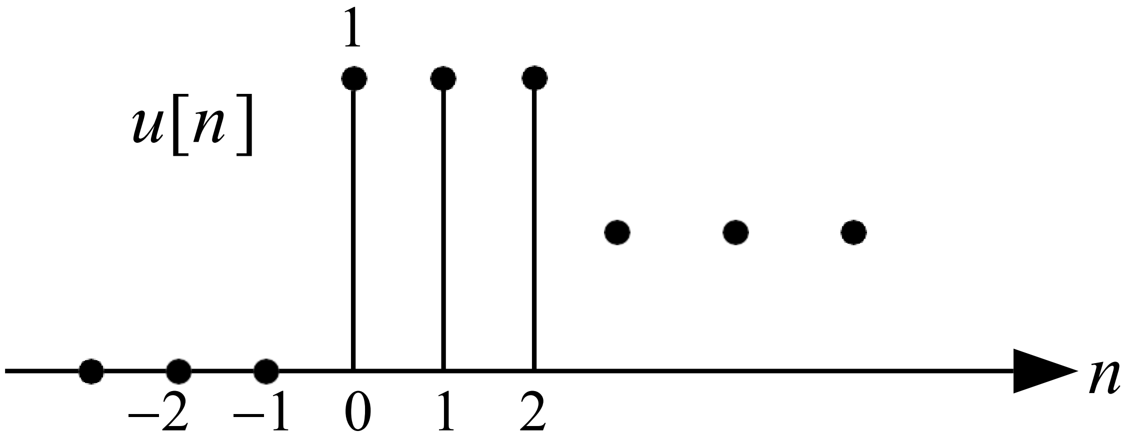
$N = 20\pi$ 无周期 ?!

$$\left.\begin{aligned} e^{j\omega n} &= \cos(\omega n) + j\sin(\omega n) \\ e^{-j\omega n} &= \cos(\omega n) - j\sin(\omega n) \end{aligned}\right\} \text{欧拉公式}$$

3.u(n)单位阶跃信号

$$u(n)=\begin{cases}1 & n\ge 0\\ 0 & n<0\end{cases}$$

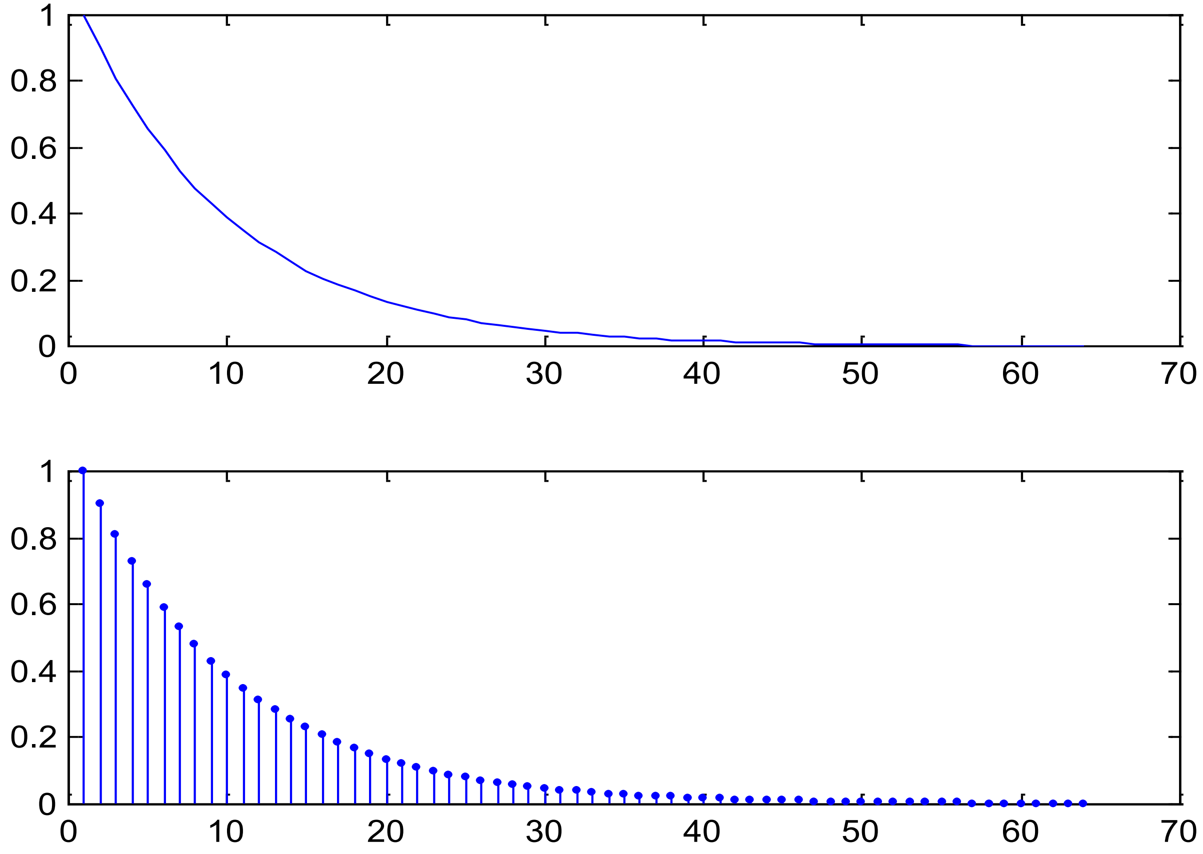
$$x(n)=x_1(n)u(n) \quad 则 \quad n\ge 0$$



4.指数信号

$$a^{|n|}, |a|<1$$

$$n=-\infty \sim 0 \sim \infty$$



指数信号 $x(t), x(n)$

单位阶跃序列、余弦序列、指数序列及正弦序列如图 1.1.4 所示。

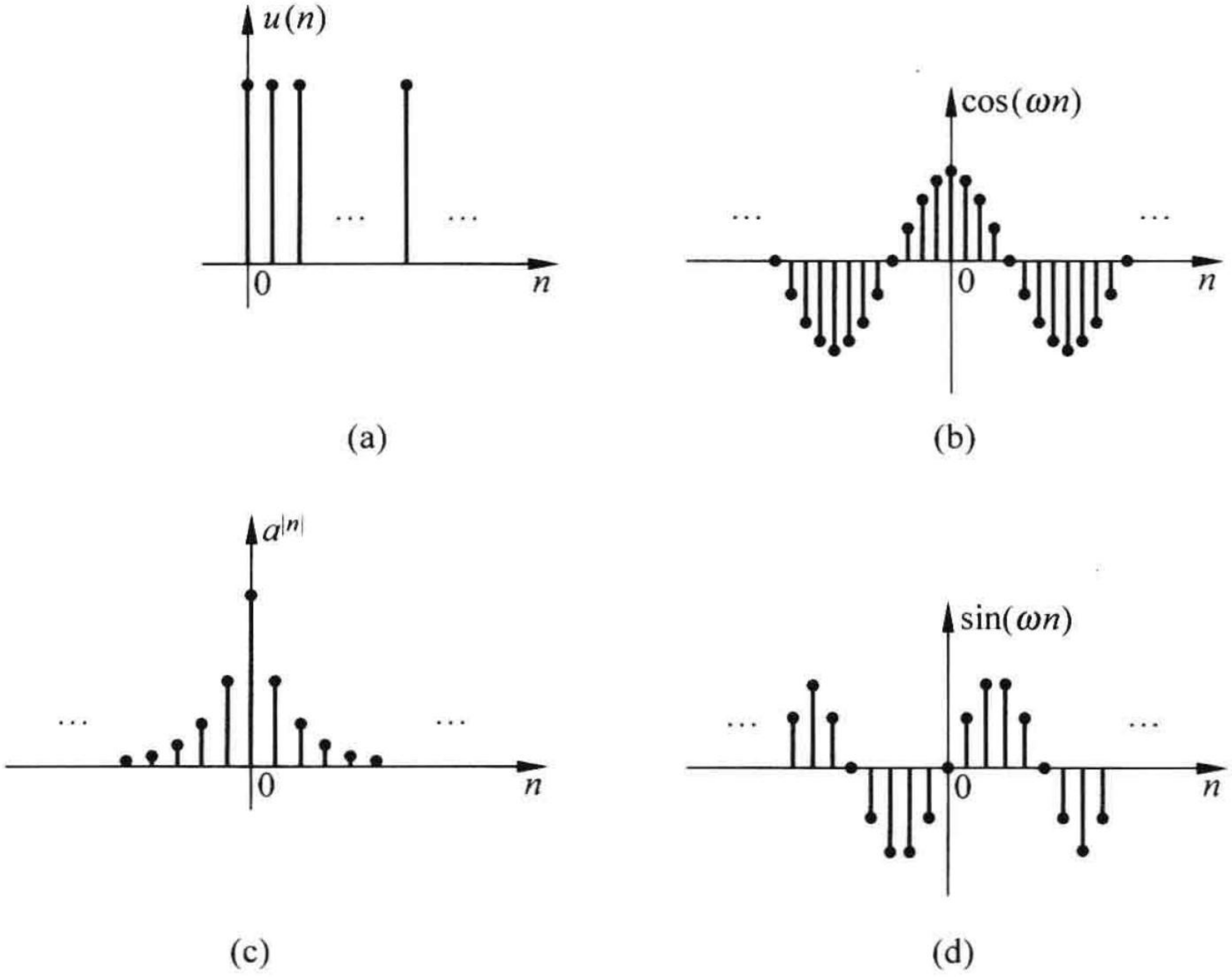


图 1.1.4　几个典型的离散序列

(a) 单位阶跃序列 $u(n)$；(b) 余弦序列；(c) 指数序列；(d) 正弦序列