



普通高等教育“十二五”规划教材  
电子信息科学与工程类专业规划教材

# 数字信号处理 (第2版)

朱冰莲 方 敏 编著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十二五”规划教材  
电子信息科学与工程类专业规划教材

# 数字信号处理（第2版）

朱冰莲 方 敏 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书系统地阐述数字信号处理的基本概念、基本理论、基本分析方法和实现方法。全书共 8 章, 主要包括: 离散时间信号和离散时间系统, 离散时间信号与系统的变换域分析, 离散傅里叶变换及快速算法, IIR 数字滤波器设计, FIR 数字滤波器设计, 数字信号处理系统的实现, 多速率信号处理基础, MATLAB 仿真实验。各章中均安排有丰富的思考题和习题。本书提供配套电子课件、习题答案和程序代码等。

本书可作为高等学校电子信息工程、通信工程、生物医学工程、电气工程、信息工程、电子科学与技术、自动化等专业本科生的理论课教材和实验指导书, 也可作为相关专业技术人员的参考书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理 / 朱冰莲, 方敏编著. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2014.7

电子信息科学与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-23291-6

I. ①数… II. ①朱… ②方… III. ①数字信号处理—高等学校—教材 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 106867 号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 王羽佳 文字编辑: 王晓庆

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 17.75 字数: 512 千字

版 次: 2011 年 6 月第 1 版

2014 年 7 月第 2 版

印 次: 2014 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 3000 册 定价: 39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010)88258888。

## 第2版前言

本书是《数字信号处理》一书的第2版。第2版保留了上一版概念清晰、重点突出、论述系统、深入浅出、易于理解、便于自学的特点。主要修订内容如下：

1. 对上一版各章节的部分内容进行修订并对已经发现的错误进行订正；
2. 考虑到该课程不仅理论性强，同时具有很强的实践性，由方敏执笔增写了第8章“MATLAB 仿真实验”作为实验指导；
3. 考虑到 MATLAB 有专门的书籍可查阅，删除了各章中有关 MATLAB 的内容及附录；
4. 由于篇幅与学时的限制，删除了原来的 4.2.5 节“模拟高通、带通及带阻滤波器设计”；
5. 根据当前流行的数字信号处理实现方法，重写了 6.3 节“实时数字信号处理的实现方法”；
6. 部分习题进行了修改和增删。

第2版不仅可作为理论教学的教材，同时也为实验教学提供参考与指导。

本书可作为高等学校电子信息工程、通信工程、生物医学工程、电气工程、信息工程、电子科学与技术、自动化等专业本科生的理论课教材和实验指导书，也可作为相关专业技术人员的参考书。

由于作者水平所限，第2版可能仍存在不少不妥甚至错误之处，恳请读者批评指正。

作 者

2014年6月于重庆大学

# 前言

数字信号处理是高等学校电子与电气类专业的重要专业基础课。学生通过本课程的学习,应该掌握数字信号处理的基本理论、基本知识和基本方法。本书根据教育部教学指导委员会对数字信号处理课程的教学基本要求,详尽地阐述了数字信号处理领域中的基本概念、基本理论、基本分析方法和设计实现方法。

本书包括7章。第1章讨论从连续到离散的过渡——连续时间信号的采样,离散时间信号与系统的一些基本概念、基本表达、基本运算及差分方程的建立与时域求解;第2章讨论离散时间信号和离散时间系统的变换域分析方法,包括 $Z$ 变换和离散时间傅里叶变换,研究离散时间系统的系统函数和频率响应;第3章涉及数字谱分析,包括离散傅里叶变换及其快速算法研究;第4章和第5章讨论数字滤波器设计的理论和方法,第4章讨论IIR数字滤波器设计,第5章讨论FIR数字滤波器设计;第6章讨论数字信号处理系统实现问题,包括数字滤波器的结构,数字信号处理中的有限字长效应以及数字信号处理的软件实现和硬件实现简介;第7章讨论多速率信号处理基础,主要涉及整数因子抽取和插值、有理数倍的采样率转换和滤波器多相结构。考虑到MATLAB作为数字信号处理研究中的重要工具使用频繁,本书在各章中均有运用MATLAB来完成相应的分析运算的内容,希望能有助于读者对原理的理解与方法的掌握。最后在本书的附录中给出了MATLAB简介,以飧读者。

本书受重庆市教改课题“信号与信息处理课程群立体化资源建设与共享”和“重庆大学十一五教材基金”资助。田逢春教授审读了全书,并提出了宝贵的修改意见,方敏老师、仲元红老师、吴华老师站在任课教师的角度,也提出了宝贵的意见,裴光术、梁辉、运明华、张松、袁虎、李波、刘海峰、杨毅、王雅兰等在本书的绘图、计算机程序的编写、资料收集及最后的编排等方面做了大量的工作,在此一并表示感谢!

限于作者的水平,不妥及错误之处在所难免,恳切希望读者予以批评指正。

作者

2010年11月于重庆大学

# 目 录

|                                  |    |                                      |     |
|----------------------------------|----|--------------------------------------|-----|
| 绪论                               | 1  | 2.3 离散时间傅里叶变换                        | 52  |
| 0.1 信号、系统与信号处理                   | 1  | 2.3.1 离散时间傅里叶变换的定义                   | 52  |
| 0.2 数字信号处理系统的基本组成与<br>数字信号处理学科内容 | 3  | 2.3.2 离散时间傅里叶变换的性质                   | 54  |
| 0.3 数字信号处理的特点                    | 4  | 2.3.3 Z 变换与拉普拉斯变换、离散<br>时间傅里叶变换的关系   | 56  |
| 0.4 数字信号处理的发展及应用                 | 5  | 2.4 离散时间系统的系统函数和频率<br>响应             | 58  |
| 第 1 章 离散时间信号和离散时间系统              | 7  | 2.4.1 系统函数与差分方程的关系                   | 59  |
| 1.1 连续时间信号的采样                    | 7  | 2.4.2 因果稳定系统的系统函数                    | 59  |
| 1.1.1 理想采样                       | 7  | 2.4.3 系统频率响应的意义及几何<br>确定             | 61  |
| 1.1.2 矩形脉冲采样                     | 11 | 2.4.4 数字全通系统与最小相移系统                  | 64  |
| 1.2 离散时间信号——序列                   | 12 | 思考题                                  | 69  |
| 1.2.1 序列的表示方法                    | 13 | 习题                                   | 69  |
| 1.2.2 序列的基本运算                    | 13 | 第 3 章 离散傅里叶变换及快速算法                   | 74  |
| 1.2.3 常用典型序列                     | 17 | 3.1 傅里叶变换的几种可能形式                     | 74  |
| 1.2.4 用单位脉冲序列表示任意序列              | 21 | 3.2 离散傅里叶级数                          | 77  |
| 1.3 离散时间系统                       | 21 | 3.2.1 离散傅里叶级数的导入                     | 77  |
| 1.3.1 线性系统                       | 21 | 3.2.2 离散傅里叶级数的性质                     | 80  |
| 1.3.2 非移变系统                      | 23 | 3.3 离散傅里叶变换                          | 82  |
| 1.3.3 线性非移变系统的单位脉冲<br>响应与线性卷积和   | 23 | 3.3.1 离散傅里叶变换的导入                     | 83  |
| 1.3.4 线性非移变系统的性质                 | 23 | 3.3.2 DFT 的性质                        | 85  |
| 1.3.5 因果系统                       | 24 | 3.3.3 DFT 性质的应用                      | 90  |
| 1.3.6 稳定系统                       | 26 | 3.4 频率采样理论                           | 94  |
| 1.4 离散线性非移变系统与差分方程               | 28 | 3.4.1 频率采样                           | 94  |
| 1.4.1 用差分方程描述离散线性非移<br>变系统       | 28 | 3.4.2 内插                             | 95  |
| 1.4.2 递推法解差分方程                   | 29 | 3.4.3 DFT 与 DTFT 和 Z 变换的关系           | 97  |
| 思考题                              | 31 | 3.5 利用 DFT 计算模拟信号的傅里叶<br>变换          | 99  |
| 习题                               | 31 | 3.5.1 利用 DFT 计算模拟信号的傅里<br>叶变换        | 99  |
| 第 2 章 离散时间信号与系统的变换域分析            | 34 | 3.5.2 利用 DFT 计算模拟信号的傅里<br>叶变换可能造成的误差 | 101 |
| 2.1 Z 变换                         | 34 | 3.5.3 用 DFT 进行谱分析的有关参数<br>选择原则       | 104 |
| 2.1.1 Z 变换的定义和收敛域                | 34 |                                      |     |
| 2.1.2 逆 Z 变换                     | 38 |                                      |     |
| 2.1.3 Z 变换的性质                    | 43 |                                      |     |
| 2.2 用单边 Z 变换解差分方程                | 50 |                                      |     |

|                             |     |                                |     |
|-----------------------------|-----|--------------------------------|-----|
| 3.6 傅里叶变换的快速算法——快速傅里叶变换 FFT | 104 | 特点                             | 163 |
| 3.6.1 DFT 运算的特点及减少计算量的途径    | 105 | 5.1.3 线性相位 FIR 滤波器的零点分布特点      | 166 |
| 3.6.2 按时间抽取的基-2 FFT 算法      | 106 | 5.2 窗函数法设计 FIR 滤波器             | 167 |
| 3.6.3 按频率抽取的基-2 FFT 算法      | 112 | 5.2.1 设计原理                     | 167 |
| 3.6.4 快速傅里叶变换 IFFT          | 114 | 5.2.2 矩形窗截断的影响                 | 168 |
| 3.6.5 $N$ 为复合数的 FFT 算法      | 114 | 5.2.3 常用窗函数                    | 170 |
| 3.7 线性卷积的 FFT 算法            | 117 | 5.2.4 窗函数法设计 FIR 数字滤波器的基本步骤    | 173 |
| 3.7.1 有限长序列线性卷积的 FFT 算法     | 117 | 5.2.5 设计举例                     | 174 |
| 3.7.2 分段卷积                  | 118 | 5.3 频率采样法设计 FIR 滤波器            | 177 |
| 3.8 线性调频 Z 变换               | 122 | 5.3.1 设计原理                     | 177 |
| 思考题                         | 126 | 5.3.2 线性相位约束条件                 | 177 |
| 习题                          | 126 | 5.3.3 过渡带采样的优化设计               | 180 |
| 第 4 章 IIR 数字滤波器设计           | 130 | 5.3.4 频率采样法设计线性相位 FIR 数字滤波器的步骤 | 181 |
| 4.1 数字滤波器设计的基本概念            | 130 | *5.3.5 频率采样的两种方法               | 183 |
| 4.1.1 数字滤波器的技术指标            | 130 | 5.4 FIR 数字滤波器的优化设计             | 185 |
| 4.1.2 数字滤波器设计的基本步骤          | 132 | 5.5 IIR 和 FIR 数字滤波器的比较         | 189 |
| 4.2 模拟滤波器的设计                | 132 | 思考题                            | 190 |
| 4.2.1 由幅度平方函数确定系统函数         | 133 | 习题                             | 190 |
| 4.2.2 巴特沃斯模拟低通滤波器的设计        | 134 | 第 6 章 数字信号处理系统的实现              | 192 |
| 4.2.3 切比雪夫模拟低通滤波器的设计        | 137 | 6.1 数字滤波器的结构                   | 192 |
| 4.2.4 椭圆滤波器                 | 144 | 6.1.1 IIR 滤波器的基本结构             | 193 |
| 4.3 模拟滤波器映射成数字滤波器的方法        | 144 | 6.1.2 FIR 滤波器的基本结构             | 195 |
| 4.3.1 冲激响应不变法               | 144 | 6.1.3 数字滤波器的格型结构               | 199 |
| 4.3.2 双线性变换法                | 147 | 6.1.4 数字滤波器的转置结构               | 203 |
| 4.4 IIR 数字滤波器的频率变换方法        | 151 | 6.2 数字信号处理系统中的有限字长效应分析         | 203 |
| 4.5 设计举例                    | 155 | 6.2.1 二进制数的表示和量化               | 204 |
| 思考题                         | 158 | 6.2.2 A/D 变换的量化效应              | 207 |
| 习题                          | 159 | 6.2.3 系数量化对数字滤波器的影响            | 211 |
| 第 5 章 FIR 数字滤波器设计           | 161 | 6.2.4 数字滤波器定点制运算中的有限字长效应       | 217 |
| 5.1 线性相位 FIR 数字滤波器的条件和特点    | 161 | 6.3 实时数字信号处理的实现方法              | 223 |
| 5.1.1 线性相位条件                | 161 | 思考题                            | 224 |
| 5.1.2 线性相位 FIR 滤波器的幅度       |     | 习题                             | 224 |
|                             |     | 第 7 章 多速率信号处理基础                | 227 |
|                             |     | 7.1 整数因子抽取                     | 227 |

|       |                        |     |       |                         |     |
|-------|------------------------|-----|-------|-------------------------|-----|
| 7.2   | 整数因子插值                 | 230 | 8.5   | 实验 5: 连续时间信号的数字处理       | 256 |
| 7.3   | 采样率的分数倍转换              | 231 | 8.5.1 | 实验目的                    | 256 |
| 7.4   | 多速率系统的多相滤波结构           | 232 | 8.5.2 | 实验原理                    | 257 |
| 7.4.1 | 抽取器与插值器的恒等变换           | 232 | 8.5.3 | MATLAB 相关基础             | 257 |
| 7.4.2 | 抽取和插值的多相滤波器结构          | 233 | 8.5.4 | 实验内容和步骤                 | 257 |
| 思考题   |                        | 234 | 8.5.5 | 实验报告要求                  | 258 |
| 习题    |                        | 235 | 8.6   | 实验 6: 数字滤波器设计           | 258 |
| 第 8 章 | MATLAB 仿真实验            | 237 | 8.6.1 | 实验目的                    | 258 |
| 8.1   | 实验 1: 时域中的离散时间信号与系统    | 237 | 8.6.2 | 实验原理                    | 258 |
| 8.1.1 | 实验目的                   | 237 | 8.6.3 | MATLAB 相关基础             | 259 |
| 8.1.2 | 实验原理                   | 237 | 8.6.4 | 实验内容和步骤                 | 263 |
| 8.1.3 | MATLAB 相关基础            | 237 | 8.6.5 | 实验报告要求                  | 264 |
| 8.1.4 | 实验内容和步骤                | 244 | 8.7   | 实验 7: 交互式图形用户界面的使用      | 264 |
| 8.1.5 | 实验报告要求                 | 244 | 8.7.1 | 实验目的                    | 264 |
| 8.2   | 实验 2: 离散时间系统的响应        | 245 | 8.7.2 | 实验原理                    | 264 |
| 8.2.1 | 实验目的                   | 245 | 8.7.3 | MATLAB 相关基础             | 264 |
| 8.2.2 | 实验原理                   | 245 | 8.7.4 | 实验内容                    | 269 |
| 8.2.3 | MATLAB 相关基础            | 246 | 8.7.5 | 实验报告要求                  | 269 |
| 8.2.4 | 实验内容和步骤                | 249 | 8.8   | 实验 8: 有限字长效应的 MATLAB 分析 | 270 |
| 8.2.5 | 实验报告要求                 | 249 | 8.8.1 | 实验目的                    | 270 |
| 8.3   | 实验 3: 变换域中的离散时间信号      | 249 | 8.8.2 | 实验原理                    | 270 |
| 8.3.1 | 实验目的                   | 249 | 8.8.3 | MATLAB 相关基础             | 270 |
| 8.3.2 | 实验原理                   | 249 | 8.8.4 | 实验内容与步骤                 | 271 |
| 8.3.3 | MATLAB 相关基础            | 251 | 8.8.5 | 实验报告要求                  | 272 |
| 8.3.4 | 实验内容和步骤                | 253 | 8.9   | 实验 9: 双音多频信号的产生与检测      | 272 |
| 8.3.5 | 实验报告要求                 | 254 | 8.9.1 | 实验目的                    | 272 |
| 8.4   | 实验 4: 变换域中的线性移不变离散时间系统 | 254 | 8.9.2 | 实验原理                    | 273 |
| 8.4.1 | 实验目的                   | 254 | 8.9.3 | MATLAB 相关基础             | 275 |
| 8.4.2 | 实验原理                   | 254 | 8.9.4 | 实验内容和步骤                 | 275 |
| 8.4.3 | MATLAB 相关基础            | 255 | 8.9.5 | 实验报告要求                  | 275 |
| 8.4.4 | 实验内容和步骤                | 255 | 参考文献  |                         | 276 |
| 8.4.5 | 实验报告要求                 | 256 |       |                         |     |

# 绪 论

数字信号处理 DSP (Digital Signal Processing) 是从 20 世纪 60 年代以来, 随着信息学科和计算机学科的高速发展而迅速发展起来的一门新兴学科。数字信号处理中, 信号用数字或符号表示, 通过计算机或通用 (专用) 信号处理设备, 用数值计算方法对其进行各种处理 (如滤波、变换、压缩、增强、估计、识别等), 从而达到提取有用信息和便于应用的目的。

## 0.1 信号、系统与信号处理

### 1. 信号

信号是消息的表现形式, 而消息则是信号所含有的具体内容。我们可以从不同的角度对信号进行分类。

**一维信号和多维信号** 从数学表达式来看, 信号可以表示为一个或多个独立变量的函数。根据独立变量的个数, 可分为一维信号和多维信号。如语音信号可表示为声压随时间变化的函数, 是一维信号。而黑白图像中每个点 (像素) 具有不同的光强度, 任一点又是二维平面坐标中  $x$ 、 $y$  两个变量的函数, 即是二维信号。实际上, 还可以有更多个变量的信号, 例如, 电磁波在三维空间中传播, 同时考虑时间变量就构成四维信号。在本书中, 只研究一维信号。

**连续信号、离散信号与数字信号** 信号即函数, 根据其自变量和函数值取连续值或离散值, 可以分成以下几种情况。

- (1) 连续信号: 自变量是连续的, 函数值可以是连续的或离散 (量化) 的。
- (2) 模拟信号: 自变量和函数值都是连续的。
- (3) 离散信号 (或称为序列): 自变量是离散的, 函数值是连续变化的。
- (4) 数字信号: 自变量和函数值都是离散 (量化) 的。

连续信号、离散信号和数字信号如图 0-1-1 所示。数字信号由于其函数值是量化的, 故可用一系列二进制码来表示。本书大部分章节是讨论离散信号——序列的分析和处理, 而有关幅值量化, 本书将集中在第 6 章研究数字信号处理系统的实现, 讨论量化效应与有限字长效应时介绍。

**周期和非周期信号** 对于连续信号而言, 所谓周期信号是指满足  $x(t) = x(t + kT)$  的信号, 其中, 周期  $T$  为正数,  $k$  为整数; 而离散信号由于自变量的取值是离散的, 所以离散周期信号是指满足  $x(n) = x(n + kN)$  的信号, 其中, 周期  $N$  为正整数,  $k$  为整数。

**能量信号和功率信号** 能量有限的信号称为能量信号。若信号的能量无限、功率有限, 则称为功率信号。连续信号的能量表示为

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

离散信号的能量表示为

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

连续信号的功率表示为

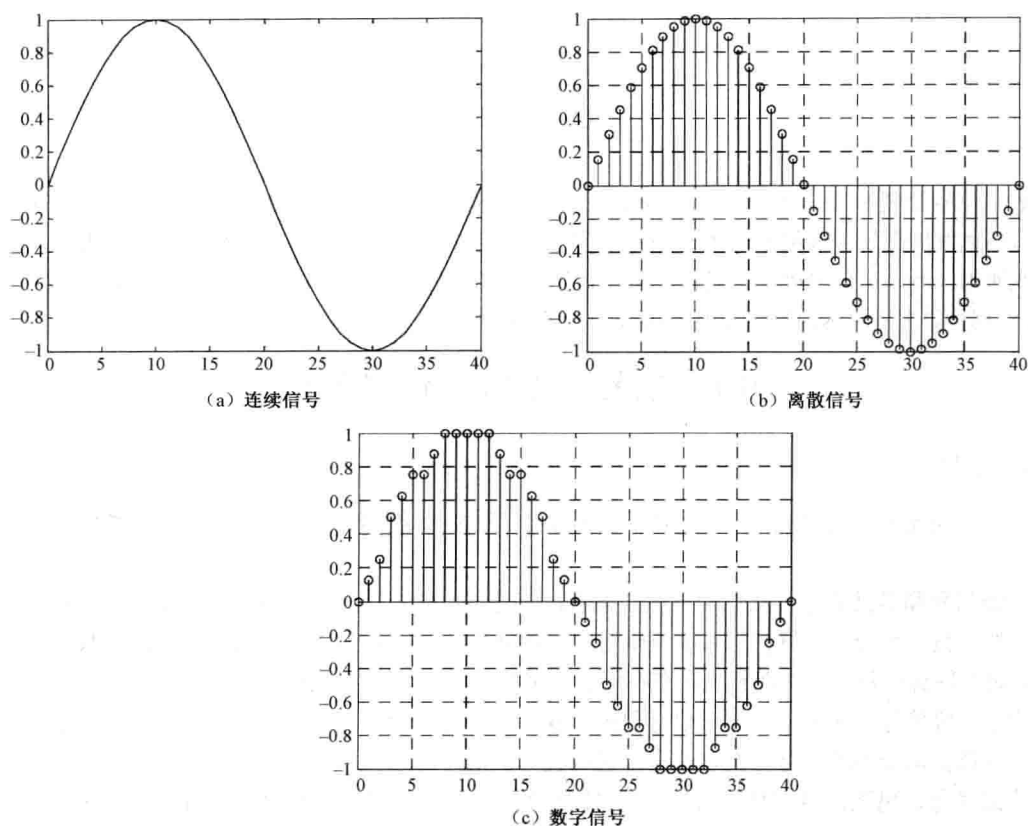


图 0-1-1 连续信号、离散信号和数字信号

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

离散信号的功率表示为

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

**确知信号和随机信号** 如果某信号对于任意给定的自变量, 可以确定相应的函数值, 这种信号称为确知信号; 如果某信号对于任意给定的自变量, 不能确定相应的函数值, 只能描述其统计特性, 这种信号称为随机信号。

## 2. 系统

凡是能将信号进行变换以满足人们要求的各种设备都可称为系统。按所处理信号的不同, 系统可分为如下几种。

**模拟系统:** 处理模拟信号的系统, 系统的输入、输出均为模拟信号;

**连续系统:** 处理连续信号的系统, 系统的输入、输出均为连续信号;

**离散系统:** 处理离散信号的系统, 系统的输入、输出均为离散信号;

**数字系统:** 处理数字信号的系统, 系统的输入、输出均为数字信号;

**混合系统:** 所处理的信号既有连续信号又有离散信号 (或数字信号)。由于现实中许多信号是连续的, 又希望用数字的方式对其进行处理, 所以, 在实际中, 经常使用混合系统。

实际上,因为系统实现的是对信号施加某种运算(操作),因而还可把软件编程(算法)也看成是一种系统的实现方法。

### 3. 信号处理

信号处理是指用系统对含有信息的信号进行某种加工处理(变换),以获得人们所希望的信号或希望的形式,使之便于提取有用信息或便于利用的过程。

数字信号处理,就是用数值计算方法对数字序列进行各种处理,把信号变换成符合要求的某种形式。例如,对数字信号进行滤波,以限制它的频带或滤除其中的噪声和干扰;对信号进行频谱分析或功率谱分析,以了解信号的频谱结构,进而对信号进行识别和利用;对信号进行某种变换,使之更适合传输、存储和应用等。

## 0.2 数字信号处理系统的基本组成与

### 数字信号处理学科内容

现实中许多信号是模拟信号,若要以数字方式处理模拟信号,则所使用的数字信号处理系统的组成原理框图如图 0-2-1 所示。其中,前置预滤波器(或称抗混叠滤波器)是一个模拟低通滤波器,目的是将待处理信号限制在系统规定的频率范围内,避免产生混叠,为模数(A/D)变换做准备。A/D 变换包括采样与量化两个环节,采样使连续信号变成离散信号,而量化则使离散信号变成数字信号;数字信号处理器完成对数字信号  $x(n)$  的处理,这种处理可有不同的实现方法,或者软件实现,即采用数字计算机或微处理机,通过软件编程对信号进行处理;或者硬件实现,即采用专用处理机或专用数字信号处理芯片实现;还可以利用通用数字信号处理芯片或可编程逻辑器件或可编程片上系统(System On a Programmable Chip, SOPC)以软硬结合的方式实现对数字信号的处理。数模(D/A)变换器将处理后的信号  $y(n)$  变成连续信号,最后经过低通滤波变成模拟信号。

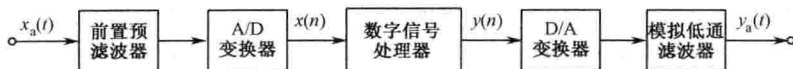


图 0-2-1 处理模拟信号的数字信号处理系统组成原理框图

图 0-2-1 所示为对模拟信号进行数字处理的系统原理框图,实际中并不一定包括框图中所有组成部分。如果系统直接以数字形式显示、打印或存储,就不需要 D/A 变换器和低通滤波器;另外,一些系统的输入本身就是数字量,此时,就不需要 A/D 变换器;如果系统的输入与输出都是数字量,则构成纯数字系统,而纯数字系统只需数字信号处理器这一核心部分。

数字信号处理学科的内容非常广泛,主要是因为它有着非常广泛的应用领域。不同的应用领域对数字信号处理有各种不同的具体要求,即使是同一应用领域中的不同问题,所使用的数字信号处理方法也可能不同。各应用领域的不同要求推动数字信号处理的理论和技术的发展,丰富数字信号处理学科的研究内容。反过来,数字信号处理学科的研究成果,又不断地促进各应用领域技术的进步。最近一二十年来,数字信号处理学科的这种理论与实际应用紧密结合并相互促进的特点,表现得尤为突出。

数字信号处理学科有着深厚的理论基础,已经形成较为完整的理论体系,主要包括以下几个方面。

- (1) 信号的采集:包括 A/D 技术、D/A 技术、多速率采样、量化噪声理论等;
- (2) 离散信号分析:包括时域及频域分析、各种变换等;
- (3) 离散线性非移变系统分析:包括系统的描述、系统的单位脉冲响应、系统函数、频率响应等;

- (4) 数字谱分析: 包括离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT) 理论、快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT)、快速卷积与相关算法等;
- (5) 数字滤波: 数字滤波器设计与实现;
- (6) 自适应信号处理;
- (7) 信号检测与估计理论;
- (8) 信号的压缩: 包括语音信号与图像信号的压缩等;
- (9) 信号的建模: 包括 AR、MA、ARMA 等各种模型;
- (10) 信号时频分析及其他特殊算法: 如同态处理、抽取与内插、信号重建等;
- (11) 数字信号处理的实现: 包括软件实现、硬件实现、软硬结合实现。

### 0.3 数字信号处理的特点

如上所述, 数字信号处理是用数值计算的方法实现对信号的处理, 可以用计算机或通用 (专用) 信号处理设备进行许多复杂的处理。相对于模拟信号处理, 数字信号处理具有以下明显的特点。

(1) 精度高。模拟处理系统的精度取决于模拟元器件的精度, 通常模拟元器件的精度很难达到  $10^{-3}$  数量级以上; 而数字处理系统的精度取决于系统的字长, 只要 14 位字长精度就可达到  $10^{-4}$ 。现在计算机的字长一般都在 32 位及以上, 如基于离散傅里叶变换的数字式频谱分析仪, 其幅值精度和频率分辨率均远远高于模拟频谱分析仪。

(2) 灵活性强。模拟处理系统升级换代需要修改硬件设计或调整硬件参数, 比较困难; 而数字处理系统只需改变软件或修改设置就可以完成系统的升级换代。如数字滤波器, 只需简单修改存储器中的系数, 就可实现不同性能的滤波器, 还可以通过一定的算法和程序自行修改滤波器系数, 实现自适应滤波器功能。

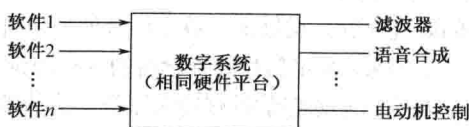
(3) 可靠性高和可重复性好。模拟系统受环境温度、湿度、噪声、电磁场等的干扰和影响大, 可靠性相对较差; 而数字系统由于信号以 0、1 表示, 电路工作在开关状态, 所以抗干扰能力更强, 因此可靠性和可重复性好。一个最简单的例子: 同样的设计, 很难安装出两个性能完全一致的模拟放大器; 而用数字方法实现时, 放大就是简单的乘法, 只要系数相同, 几乎没有不同的结果。

(4) 易于大规模集成。数字器件由于具有高度的规范性, 便于大规模集成和生产, 相对模拟集成电路具有体积小、功能强、功耗小、一致性好、使用方便、性价比高等优点。

(5) 便于复用。一套模拟系统硬件一般只能对应一种功能, 而数字系统是可以复用的。一方面数字信号的两采样值之间存在时隙, 因此可以在同步器的控制下, 在两采样值之间的时隙中送入其他信号, 这样, 各路信号可以利用同一个信号处理器进行处理, 实现时分复用; 另一方面, 对于同一个数字硬件系统平台, 只要安装上不同的软件, 就可实现不同的处理功能, 完成不同的信号处理, 因此数字平台也是可以复用的。数字系统的复用如图 0-3-1 所示。



(a) 时分多路复用数字信号处理系统



(b) 数字平台复用

图 0-3-1 数字系统的复用

(6) 特殊应用。有些应用只有数字系统才能实现, 如信息无失真压缩、点阻滤波器、逼近非因果系统、线性相位滤波器等。

(7) 多维处理。利用庞大的存储单元, 可以存储二维图像信号或多维阵列信号, 实现二维或多维的滤波及谱分析等。

正是由于数字信号处理的这些突出优点, 使得它在语音处理、图像处理、通信、雷达、声呐、地球物理学、消费电子、仪器仪表、生物医学信号处理等方面得到了广泛的应用。

## 0.4 数字信号处理的发展及应用

由于是用数字计算的方法实现对信号的处理, 所以从某种意义上看, 可以认为数字信号处理是许多算法的汇集, 因而, 它是计算数学的一个分支。而计算数学早在 17~18 世纪中叶就已经发展起来, 所以, 也可以说数字信号处理是一门古老的学科。但是, 数字信号处理又是一门新兴的学科, 因为它的学科体系在 20 世纪 40 年代至 50 年代才建立起来。数字信号处理技术的迅速发展是从 20 世纪 60 年代开始的, 其主要标志是两项重大进展, 即傅里叶变换的快速算法的提出和数字滤波器设计方法的完善。

在 20 世纪 40 年代至 50 年代建立的取样数据系统理论, 是数字信号处理理论的前身, 因为它还不是真正的数字信号处理系统的理论, 它只是线性连续系统理论的拓展。20 世纪 50 年代末期至 60 年代初期, 随着数字计算机被用于信号处理, 才在真正意义上有了对数字信号处理理论的研究。到了 20 世纪 70 年代, 数字信号处理已经发展成为一门不再依赖于模型方法和模拟实验的独立发展的学科。进入 20 世纪 80 年代以后, 特别是在 20 世纪 90 年代中期, 数字信号处理的理论和技术更加成熟, 它开始渗透到许多重要的学科领域, 并与语音、图像、通信等信息产业紧密结合, 不断在理论上有所突破, 在技术上有所创新, 开辟了一个又一个新的学科分支, 以至于现在很难脱离其他学科领域来孤立地谈论数字信号处理学科的发展历史和取得的成就。

从数字信号处理算法的角度来说, 如果设计出的算法好, 就意味着在使用同样速度的计算机、数字信号处理器或数字硬件的条件下, 能以更高的计算速度、更有效率地完成对数字信号的处理任务。继快速傅里叶变换之后, 又出现了许多构思奇特、处理精巧、性能优良的新算法, 如数论变换、多项式变换等。20 世纪 80 年代末 90 年代初, 小波理论和人工神经网络、混沌等方法的研究更是将数字信号处理推向一个新的研究热潮。如今, 各种智能算法及应用研究方兴未艾。直到今天, 关于快速算法的研究一直没有停止过, 将来也一定是数字信号处理研究的重要课题。从实时处理和应用的角度来讲, 大规模集成电路的发展极大地推动了数字信号处理应用的普及。早期的数字频谱分析和数字滤波等研究工作主要用软件来实现, 当时数字滤波器虽然在语音、声呐、地震和医学等信号处理中曾经发挥过巨大作用, 但对于数字信号处理系统, 如果只局限于用软件来实现, 那么, 其应用的范围必然存在很大局限。这一不利局面在 20 世纪 70 年代有了极大的改变, 主要原因是大规模和超大规模集成电路技术、高速算术运算单元、双极型高密度半导体存储器、电荷转移器件等新技术和新工艺的出现和结合, 加上采用了计算机辅助设计方法, 使得数字滤波器的硬件实现有了坚实的物质基础。特别是现代数字信号处理器 (Digital Signal Processors, DSP) 芯片更是成为现代数字信号处理涉及的应用领域中不可或缺的器件。近年来, 可编程逻辑器件如 FPGA 等的广泛应用更为数字信号处理的实现提供了新的手段。

研究更快的计算方法、更高集成度的处理器件、更强的处理功能以适应更广泛的应用, 可以说是数字信号处理今后发展的方向。

数字信号处理的应用非常广泛, 这里只列举部分最成功的应用领域。

(1) 语音处理。包括语音信号分析、语音合成、语音识别、语音增强、语音编码等, 是最早应用数字信号处理技术的领域之一, 也是最早推动数字信号处理理论发展的领域之一。近年来, 语音处理

方面取得了不少研究成果,并且,在市场上已出现了一些相关的软件和硬件产品,例如,盲人阅读机、失语人语音合成器、口授打字机、语音应答机、各种会说话的仪器和玩具,以及通信和视听产品等。

(2) 图像处理。数字信号处理技术已成功地应用于静止图像和活动图像的恢复和增强、数据压缩、去除噪声和干扰、图像识别、图像检索等。

(3) 通信。在现代通信技术领域内,几乎没有一个分支不受到数字信号处理技术的深刻影响。信源编码、信道编码、调制解调、多路复用、数据压缩、信道估计、多用户检测及自适应信道均衡等,都广泛地采用了数字信号处理技术。可以说,在数字通信、网络通信、图像通信、多媒体通信等应用中,离开了数字信号处理技术,几乎寸步难行。

(4) 消费电子。包括数字音频、数字电视、数码相机、电子玩具和游戏、汽车电子装置等。

(5) 仪器仪表和工业控制。如今大量的仪器仪表使用数字信号处理技术,如频谱分析仪、函数发生器、矢量信号分析仪等,包括机器人控制、激光打印控制、计算机辅助制造、伺服控制、自适应驾驶控制等,无处不是数字信号处理的应用。

(6) 军事。在军事中被大量应用于雷达、声呐、导航、制导、电子对抗、战场侦察等。雷达信号占有的频带非常宽,数据传输速率也非常高,因而压缩数据量和降低数据传输速率是雷达信号数字处理面临的首要问题。虽然雷达信号处理早就是数字信号处理的重要应用领域,但至今仍然是十分活跃的研究领域之一。

(7) 地球物理学。这是一个应用数字信号处理技术已有相当长历史的领域。该领域中信号处理的重要任务之一是分析地震信号,建立描述地层内部结构和性质的模型,这对石油和矿藏的勘探很有帮助。另一任务是用信号处理方法研究地震和火山的活动规律。此外,近年来数字信号处理技术还被应用于大气层性质的研究,如分析大气层中电子的含量。

(8) 生物医学信号处理。数字信号处理技术在医学中的应用日益广泛,例如,对脑电图和心电图的分析、层析 X 射线摄影的计算机辅助分析、胎儿心音的自适应检测等。

(9) 其他领域。数字信号处理技术的应用领域如此广泛,以至于想完全列举它们是根本不可能的。除了以上几个领域外,还有许多其他的应用领域。例如,在电力系统中被应用于能源分布规划和自动检测与监视,在环境保护中被应用于对空气污染和噪声干扰的自动监测,在经济领域中被应用于股票市场预测和经济效益分析,等等。

可以说,一方面,数字信号处理理论和技术的应用,依赖于超大规模集成电路技术、计算机技术和软件设计技术的发展,另一方面,数字信号处理理论和技术的应用取决于我们的想象空间!

# 第1章

## 离散时间信号和离散时间系统

### 1.1 连续时间信号的采样

在本书中,主要研究的是离散时间信号,但在现实生活中存在的绝大多数信号是连续时间信号。如语音、图像、温度、压力等。要利用数字信号处理技术实现对这些信号的处理,需要借助 A/D 变换,先将模拟信号转变为数字信号后,才能利用数字技术对其进行加工处理。因此,采样是从连续到离散的桥梁。本节主要讨论时域采样,分析时域采样对信号频谱产生的影响及不失真条件。



#### 1.1.1 理想采样

对连续时间信号  $x_a(t)$  进行采样的过程,可以视为一个连续时间信号  $x_a(t)$  通过一个电子开关,如图 1-1-1(a)所示。该电子开关每隔时间  $T$  闭合一次,每次闭合时间为  $\tau$  ( $\tau \ll T$ )。这样,就可在电子开关的输出端得到采样信号  $\hat{x}_a(t)$ 。这里电子开关的作用等效为一个宽度为  $\tau$ 、周期为  $T$  的矩形脉冲序列  $p(t)$ ,采样信号  $\hat{x}_a(t)$  就是  $x_a(t)$  与矩形脉冲序列  $p(t)$  相乘的结果。采样信号的波形如图 1-1-1(b)所示。令电子开关闭合时间  $\tau \rightarrow 0$ ,那么,实际采样就变为间隔  $T$  秒闭合一次的理想采样。这时,矩形脉冲序列  $p(t)$  就趋于闭合时间无穷短的单位冲激序列  $\delta_T(t)$ 。理想采样就是  $x_a(t)$  与单位冲激序列  $\delta_T(t)$  相乘的结果,如图 1-1-1(c)所示。

现在的问题是,连续时间信号  $x_a(t)$  被采样后,采样信号与连续时间信号比较,会有什么变化?是否丢失信息?什么条件下才能从采样信号  $\hat{x}_a(t)$  中不失真地恢复出原来的信号  $x_a(t)$ ? 为了回答这些问题,需要分析以下几个问题。

#### 1. 连续时间信号采样后频谱的变化

如上所述,在理想采样情况下,  $\tau \rightarrow 0$ , 采样脉冲序列  $p(t)$  变成单位冲激序列  $\delta_T(t)$

$$\delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-nT) \quad (1-1-1)$$

理想采样输出

$$\hat{x}_a(t) = x_a(t) \cdot p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_a(t) \delta(t-nT) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_a(nT) \delta(t-nT) \quad (1-1-2)$$

假设连续时间信号的频谱

$$X_a(j\Omega) = \text{FT}[x_a(t)]$$

采样脉冲序列  $p(t)$  的频谱

$$P(j\Omega) = \text{FT}[\delta_T(t)]$$

理想采样输出  $\hat{x}_a(t)$  的频谱函数

$$\hat{X}_a(j\Omega) = \text{FT}[\hat{x}_a(t)]$$

$\delta_T(t)$  的傅里叶变换

$$P(j\Omega) = \text{FT}[\delta_T(t)] = \frac{2\pi}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\Omega - k\Omega_s) = \Omega_s \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\Omega - k\Omega_s) \quad (1-1-3)$$

式中,  $T$  是采样间隔,  $\Omega_s = 2\pi/T$ 。

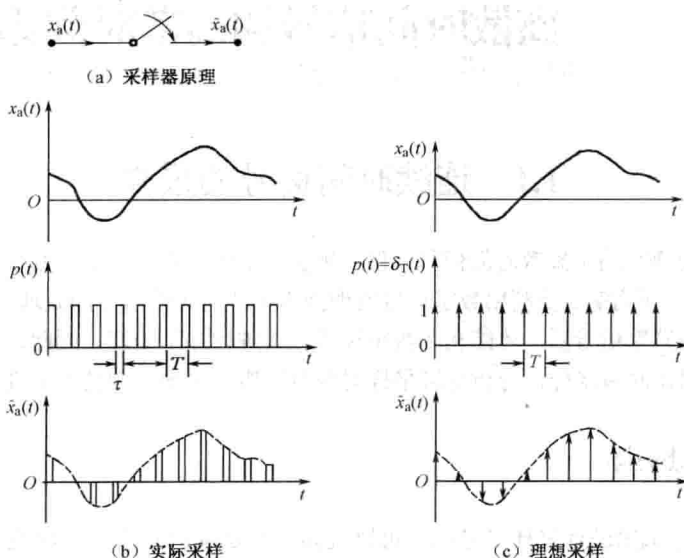


图 1-1-1 连续时间信号的采样

可见,  $P(j\Omega)$  是在频率点  $k\Omega_s$  处强度为  $2\pi/T$  的周期性冲激脉冲序列。根据傅里叶变换的频域卷积定理

$$\hat{X}_a(j\Omega) = \text{FT}[\hat{x}_a(t)] = \frac{1}{2\pi} X_a(j\Omega) * P(j\Omega) \quad (1-1-4)$$

将式 (1-1-3) 代入式 (1-1-4) 中, 得

$$\hat{X}_a(j\Omega) = \frac{1}{2\pi} \frac{2\pi}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\Omega - k\Omega_s) * X_a(j\Omega) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_a(j\Omega - jk\Omega_s) \quad (1-1-5)$$

式 (1-1-5) 表明, 一个连续时间信号经过理想采样后, 其频谱将以采样频率  $\Omega_s = 2\pi/T$  为周期重复, 也就是频谱以  $\Omega_s$  为周期进行周期延拓, 且频谱的幅度受  $1/T$  加权。为了便于说明问题, 设  $x_a(t)$  是带限信号,  $x_a(t)$  的最高截止频率为  $\Omega_m$  (即信号中不存在大于等于  $\Omega_m$  的频率分量), 其频谱如图 1-1-2(a) 所示,  $\delta_T(t)$  的频谱  $P(j\Omega)$  如图 1-1-2(b) 所示, 如果满足  $\Omega_s \geq 2\Omega_m$ , 或满足  $f_s \geq 2f_m$ , 则周期延拓形成的频谱不重叠, 如图 1-1-2(c) 所示。从图 1-1-2(c) 可见, 由于  $T$  是常数, 所以除了一个常数因子的区别外, 每个延拓得到的分量都和原频谱分量相同, 因此, 可以恢复出原信号。也就是说, 如果  $x_a(t)$  是带限信号, 其最高频谱分量  $\Omega_m$  不超过  $\Omega_s/2$ , 即

$$X_a(j\Omega) = 0 \quad |\Omega| \geq \Omega_s/2 \quad (1-1-6)$$

那么, 周期延拓形成的频谱分量彼此不重叠, 这时若采用一个图 1-1-3 所示的截止频率为  $\Omega_s/2$  的理想低通滤波器对  $\hat{X}_a(j\Omega)$  滤波, 就可以不失真地还原出原来的连续时间信号, 即

$$Y_a(j\Omega) = \hat{X}_a(j\Omega) \cdot H(j\Omega) = X_a(j\Omega), \quad \Omega_m < \Omega_s/2 \quad (1-1-7)$$

式中

$$H(j\Omega) = \begin{cases} T, & |\Omega| < \Omega_s/2 \\ 0, & |\Omega| \geq \Omega_s/2 \end{cases} \quad (1-1-8)$$

对  $Y_a(j\Omega)$  取傅里叶逆变换

$$y_a(t) = \text{IFT}[Y_a(j\Omega)] = x_a(t), \quad \Omega_m < \Omega_s/2 \quad (1-1-9)$$

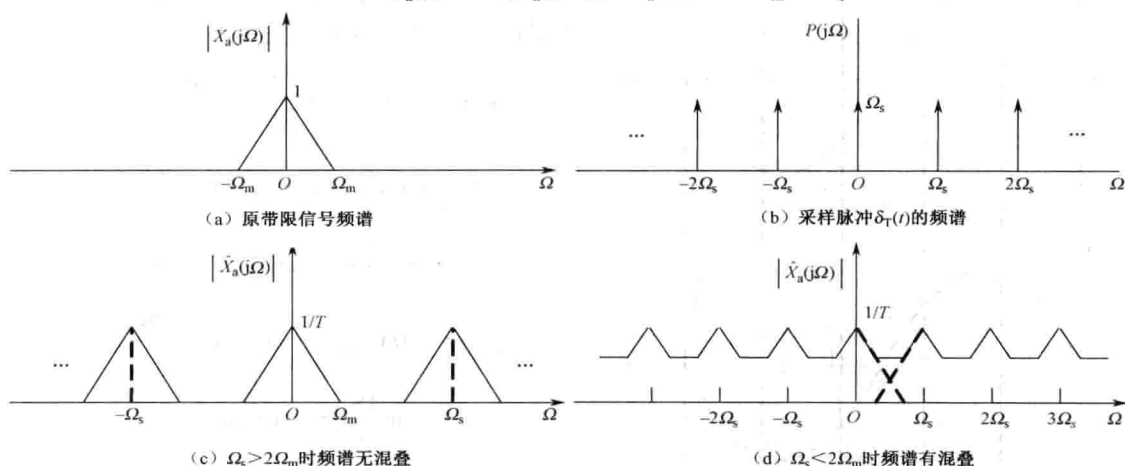


图 1-1-2 信号及采样前后的频谱

如果选择的采样频率太低, 即  $f_s < 2f_m$ , 或者说信号的最高频率  $f_m$  超过  $f_s/2$ , 则  $X_a(j\Omega)$  按照采样频率周期延拓时, 各周期延拓分量产生频谱的交叠, 这种现象称为频谱混叠, 如图 1-1-2(d) 所示。注意  $X_a(j\Omega)$  一般是复数, 所以混叠也是复数相加。采样频率  $f_s$  的一半  $f_s/2$  ( $f_s = 1/T$ ) 如同一面镜子, 当信号频谱超过它时, 就会被折叠回来, 造成频谱的混叠, 故称  $f_s/2$  为折叠频率。只有当信号最高频率不超过折叠频率时, 才不会产生频率混叠现象, 否则, 超过  $f_s/2$  的部分会折叠回来造成频谱混叠, 所以频率混叠均产生在  $f_s/2$  附近。

由此得出以下结论。

(1) 对连续时间信号进行等间隔采样形成的采样信号, 其频谱是原连续时间信号的频谱以采样频率为周期的周期延拓, 并被  $1/T$  加权。如果连续时间信号的频谱为  $X_a(j\Omega)$ , 则采样信号的频谱可表示为式 (1-1-5)。

(2) 如果连续时间信号  $x_a(t)$  是最高截止频率为  $\Omega_m$  的带限信号, 采样频率  $\Omega_s \geq 2\Omega_m$ , 那么, 让采样信号  $\hat{x}_a(t)$  通过一个增益为  $T$ 、截止频率为  $\Omega_s/2$  的理想低通滤波器, 可以无失真地恢复出原连续时间信号  $x_a(t)$ 。否则,  $\Omega_s < 2\Omega_m$  会造成采样信号中的频谱混叠现象, 不能无失真地恢复原连续时间信号。这就是著名的奈奎斯特采样定理的内容。

注: 如果  $\Omega_m$  是信号  $x_a(t)$  的最高频率, 则上述结论中的 “ $\geq$ ” 应取为 “ $>$ ”。

## 2. 频谱混叠

如前所述, 如果信号中含有超过  $f_s/2$  的频率成分, 就会产生频谱混叠现象。为了进一步解释这种现象, 来看一个例子。

设  $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 、 $x_3(t)$  分别为

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \sin(2\pi f_1 t) & f_1 &= 50\text{Hz} \\ x_2(t) &= -\sin(2\pi f_2 t) & f_2 &= 200\text{Hz} \\ x_3(t) &= -\sin(2\pi f_3 t) & f_3 &= 450\text{Hz} \end{aligned}$$

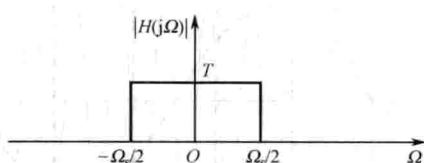


图 1-1-3 理想低通滤波器的幅度特性