

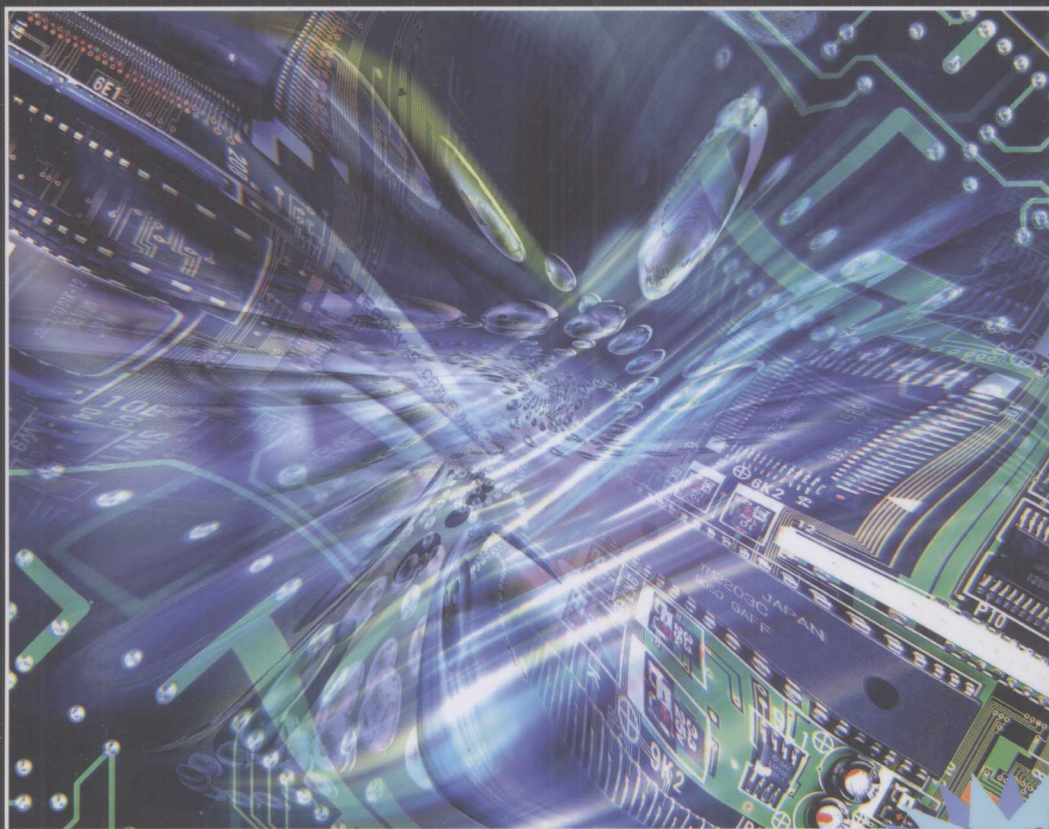


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 离散信号处理 ——应用与实践

张延华 黎玉玲 编著

第2版



免费  
电子课件



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 离散信号处理

## ——应用与实践

第2版

张延华 黎玉玲 编著



机械工业出版社

本书主要介绍离散信号处理的基本概念、基本分析方法及应用技术。全书共9章,内容包括离散时间信号与系统的基础理论、离散时间傅里叶分析(DTFT)、离散傅里叶变换(DFT)及快速算法(FFT)、数字滤波器结构及IIR和FIR滤波器的设计、自适应滤波等。本书以离散信号滤波为应用背景,结合L点MA滤波器、加权移动平均滤波器(WMA)和双加权移动平均滤波器(WMA),讨论了真实金融数据分析的实际应用,对噪声序列的滤波、双音多频(DTMF)信号的检测、太阳黑子活动周期的分析、MACD决策、胎儿心电图中的噪声抑制和回声消除等实际应用问题也进行了案例式讨论。书中给出了大量的仿真应用案例,对多种滤波算法也给出了大量的数值仿真例子,并且还给出了MATLAB算法的仿真程序代码。

本书可作为高等院校电类、机械工程与应用电子技术、生物医学工程、金融数据分析等专业的教材,也可作为从事信号处理工作的工程技术人员参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

离散信号处理:应用与实践/张延华,黎玉玲编著. —2版. —北京:机械工业出版社,2009.12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-28803-9

I. 离… II. ①张…②黎… III. 离散信号-信号处理-高等学校-教材 IV. TN911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第217556号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:于苏华 责任编辑:于苏华 常建丽

封面设计:张静 责任校对:陈延翔 责任印制:杨曦

唐山丰电印务有限公司印刷

2010年3月第2版第1次印刷

184mm×260mm·20.5印张·507千字

标准书号:ISBN 978-7-111-28803-9

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

## 第2版前言

众所周知, 数字信号处理 (DSP) 在许多领域得到了极为广泛的应用。这些领域包括通信、雷达、声纳、多媒体技术、信息搜索引擎、地震勘探、生物医学、电子学、人工智能、控制决策以及金融数据分析等。本书通过对 DSP 重要概念及其时 - 频转换关系的讨论, 希望读者能够在时域和频域中对变换和滤波器进行思考, 并能不太费力地在两者中进行转换。

考虑到 DSP 技术及其应用方面的最新进展, 本书与第 1 版 (作者为张延华、姚林泉、郭玮) 相比, 主要在简化内容体系方面进行了修订, 包括增补新的内容, 增加了真实数据的获取和实际的应用, 补充了应用实例, 强化了理论与实践的融合。具体修订内容如下:

第 2 章讨论离散时间信号与系统的基本概念以及若干重要的信号类型, 提出几种基本的和重要的运算, 补充了离散序列的应用, 序列的卷积和相关等内容, 并重新编写了数字滤波器部分, 增加了真实数据的获取和实际的应用。特别是强调了用 MATLAB 表示和模拟实现离散信号和系统。

第 3 章利用离散时间傅里叶变换作为离散时间信号和系统的复频域描述工具, 重点介绍了离散时间傅里叶变换及其性质, 讨论了离散时间傅里叶变换在系统分析和信号处理中的应用。对第 1 版中涉及到的一些基本概念和数学描述进行了删减和重写, 补充了 DTFT 的应用一节, 增加了 L 点 MA 滤波器、加权移动平均 (WMA) 滤波器和双加权移动平均 (WMA) 滤波器 3 个真实金融数据的应用案例。

第 4 章给出离散序列的  $z$  变换的定义, 重点介绍了如何用  $z$  变换来解决各种实际问题。对第 1 版中的收敛域、DTFT 与  $z$  变换的关系、 $z$  变换相关性质、逆  $z$  变换和系统函数等内容进行了重写, 补充了噪声序列的滤波和 MACD 决策的应用案例。

第 5 章讨论 DFT 在信号处理方面的应用, 并给出用快速傅里叶变换 (FFT) 算法计算 DFT 及其逆变换的方法。修订重点在于新增了用 FFT 计算傅里叶变换、双音多频 (DTMF) 信号的检测、太阳黑子活动周期的分析和股票价格分析 4 个实际应用案例。

第 6 章讨论 IIR 和 FIR 滤波器的结构特点及其实现技术, 并提供相应的 MATLAB 函数实现这些结构。同时, 本章还新增了 IIR 和 FIR 滤波器的选择一节。

第 7 章讨论 IIR 滤波器的设计问题。本章特别强调基于滤波器设计及分析工具 (FDA-Tool) 的设计技术, 并给出了大量的设计实例。

第 8 章从对称序列及它们在 FIR 滤波器中的应用出发, 叙述 FIR 滤波器设计的不同方法, 包括窗函数和频率采样。本章重点修订了基于 MATLAB 环境的滤波器设计技术及基于可视化计算的滤波器设计技术。

第 9 章介绍自适应数字滤波理论的基础知识及其典型应用, 重点讨论胎儿心电图中的噪声抑制和回声消除两个实际应用案例。

### 关于读者

本书在编写上对读者的专业背景无所偏倚, 但假定读者对初等微积分和复变函数有一定

的了解，对矩阵代数也有初步的认识。

### 关于作者

本书由张延华教授负责全书内容体系的制订并统稿。具体分工为：第2~5、8、9章由张延华编写，第1、6、7章由黎玉玲编写，各章习题由黎玉玲完成，各章程序及教学课件由黎玉玲制作、验证。

### 本书的特点

本书将原书名《数字信号处理——基础与应用》改为现在的书名，这是考虑到本版所处理的信号虽然都具有离散时间特性，但不都是数字的。也就是说，本版中讨论的离散时间信号其幅度有些是被量化了的（数字信号），有些幅度却是模拟量的（如金融时间数据等）。

鉴于 MATLAB 在国外已成为 DSP 课程的标准教学软件，本版在第1版成功引入 MATLAB 的基础上，仍然使用它来讨论各种算法的设计及具体的计算机实现。

与同类教材相比，本书具有如下特点：

- 通过工程应用案例说明 DSP 的基本概念和基本方法，强调它们的重要性和相互关系。
- 重要的公式和算法一般都有图形解释，疑难之处处理得体。
- 本版增加了真实数据的下载及其工程应用。这些应用直接从互联网上下载真实数据，并将数据导入 MATLAB，然后利用本书讨论的方法和技术对导入的数据进行分析和处理。
- 在理论与实践的融合方面，希望引导读者在有噪声的环境中通过分析股票价格数据的涨跌趋势，理解 DSP 的精髓。

### 本书的使用

本书可作为大专院校数字信号处理课程的教材，也可作为多种专业工程技术人员的基础参考书。作为教材时，它直接面向高年级工程类学生；作为参考书时，它通过每个章节中的工程应用分析来扩大视野。

### 软件说明

本书在 DSP 的基础理论和先进的计算软件——MATLAB/Simulink 之间进行了二者的整合，并为每章的论题提供了相应的 MATLAB 子程序或者 Simulink 仿真模型。这些子程序可以进行自身演示，也可以用来加深印象、巩固基本概念和验证算法结果，并且有助于解决一些实际的设计问题。因为本书的主要目的是介绍 DSP 技术而不是介绍应用软件，所以在正文中没有引入 MATLAB/Simulink 的使用介绍。如果读者需要了解 MATLAB/Simulink 的有关知识，可以浏览 MATLAB 的官方网站：<http://www.mathworks.com>。

### 致谢

研究生白杨、周晓杰、董燕、段志彬、张然、卢丹蕾、陈刚、李磊、管建中、宋治坤等参加了本书部分章节内容的整理和录入工作。机械工业出版社对本书的出版给予了热情支持，在此一并表示感谢。

本书在编写过程中参考了许多著作和教材，在此向书末参考文献中列出的所有作者表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

**编著者**

# 第1版前言

众所周知,数字信号处理(DSP)作为一门具有重要应用前景的学科分支,正在诸如通信、雷达、声纳、控制、神经网络、地震勘探、生物医学电子学、人口统计以及金融、证券等领域不断地取得新的进展。由此不仅发展出适应自身特殊需要的精深的DSP技术,而且对基础理论和应用亦产生了革命性的影响。鉴于DSP有相对自成体系的应用背景、数学需求、算法研发和各种专门的技术,因而在内容的深度和广度上使初学者很难全面理解和掌握最新的DSP技术,但它同时也促进了众多学科领域的高年级大学生、研究生和应用工程师学习和掌握DSP的迫切需求。

显而易见,学习DSP应包括两方面的内容:一是学习DSP涉及的重要概念、基本理论和方法;二是掌握适用于某一专业领域的特殊算法或者应用技术。所幸的是,在过去的几年中,随着计算机硬件性能的大幅提升和软件功能的日益增强,促使DSP的教学方式发生了深刻的变化。首先,过去作为研究生课程的数字信号处理,其基础部分现已纳入许多大学本科阶段的教学计划中;第二,教学方式也由过去单一的课堂讲授发展到今天的讲课和实验一体化的模式,其中包括算法的仿真和DSP硬件的实现;第三,针对DSP概念抽象、算法计算量大的特点,引入先进的数学软件进行DSP的教学和实验已成为趋势;第四,由于MATLAB能够有效地提高DSP课程的教学效果,在国外已成为该课程的标准教学软件并取得了良好的效果。

本书的编写正是基于这样一种考虑,即传统的DSP资料一般是为专业读者准备的,因为他们需要严密的数学来理解DSP的最新理论和潜在的可能应用;但大多数DSP的应用技术并非需要高深的数学理论才能被掌握。因此,作为适应多专业需求的DSP应用教程,作者希望在强调DSP的基本概念、基础理论和方法的同时,在不追求算法设计的详细数学论证的前提下,基于MATLAB语言对一些应用问题通过图形建模和可视化计算手段,形象和生动地揭示算法设计及实现的流程,为读者了解和掌握DSP的理论及应用打下坚实的基础,提高应用理论解决实际问题的综合能力。

## 关于读者

本书在编写上对读者的专业背景无所偏倚,但假定读者对初等微积分和复变函数已有一定的了解,对矩阵代数也有初步的认识。

## 本书的组成

本书强调DSP的基本原理及应用。通过对时域、频域重要概念及其时-频转换关系的讨论,希望读者能够在时域和频域中进行自由的思考,并能不太费力地在两者中进行转换。因此,本书在内容的安排上进行了精心的组织,力求为读者使用本书提供最大的方便。

全书共10章。第1章信号和信号处理,第2章离散时间信号与系统,第3章离散时间傅里叶分析,第4章 $z$ 变换,第5章离散傅里叶变换及快速算法,第6章数字滤波器结构,

第7章 IIR 滤波器的设计, 第8章 FIR 滤波器的设计, 第9章自适应滤波及其应用和第10章数字信号处理的应用。

## 本书的使用

本书一方面可作为高等院校数字信号处理课程的教科书, 另一方面也能够成为多种专业工程技术人员的基础参考书。作为教科书, 它直接面向高年级工程类学生; 作为参考书, 则试图通过每章中的应用例题以及后几章中引入的一些独立论题来扩大视野。本书光盘配有书中全部例题及大部分论题的 MATLAB 程序 (包括 Simulink 仿真模型), 这些程序不仅仅是例题或者算法的演示程序, 它们同样可以用于解决实际问题并进行 DSP 的高级设计。

## 本书的特点

与同类教材相比, 本书具有如下特点:

- (1) 通过实例说明 DSP 的基本概念和基本方法, 强调它们的重要性和相互关系。
- (2) 公式和算法一般都有图形解释, 疑难之处处理得体。
- (3) 在传统的基础理论和先进的计算工具——MATLAB/Simulink 之间进行了二者的整合。这样有助于读者在学习数字信号处理理论的同时, 借助 MATLAB/Simulink 加深对问题的理解, 有利于读者用计算机实践 DSP 的众多理论和算法, 同时也为把这些理论和算法应用于工程实际打下很好的基础。
- (4) 本书给出许多经典而又内容丰富的应用实例, 特别是这些例子均是“活”的, 就是说例子的框图一般就是它的 Simulink 仿真模型。
- (5) 随书光盘给出书中所有例子和应用的 MATLAB 程序 (包括 Simulink 仿真模型)。

## 软件说明

本书在 DSP 的基础理论和先进的计算软件——MATLAB/Simulink 之间进行了二者的整合, 为每章的论题提供了相应的 MATLAB 子程序或 Simulink 仿真模型。这些子程序可以进行自身演示, 也可以用来加深印象、巩固基本概念和验证算法结果, 并且有助于解决一些实际的设计问题。当然, 我们的主要目的是介绍 DSP 技术而不是应用软件, 所以在正文中没有引入 MATLAB/Simulink 的使用介绍。如果读者需要了解 MATLAB/Simulink 的有关知识, 可以浏览 MATLAB 的官方网站: <http://www.mathworks.com>。

本书第1至第6章由张延华编写; 第7至第9章由姚林泉编写; 第10章算例及全书程序由郭玮提供和验算。全书由张延华统稿。

**编著者**

2004年9月

# 目 录

## 第2版前言

## 第1版前言

## 第1章 信号和信号处理 ..... 1

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 1.1 数字信号处理的起源 .....            | 1  |
| 1.2 信号的特征和分类 .....             | 2  |
| 1.3 典型信号运算 .....               | 3  |
| 1.3.1 基本时域操作 .....             | 3  |
| 1.3.2 滤波 .....                 | 3  |
| 1.3.3 复信号的产生 .....             | 5  |
| 1.3.4 调制和解调 .....              | 5  |
| 1.3.5 多路复用和信号分离 .....          | 8  |
| 1.3.6 正交幅度调制 .....             | 9  |
| 1.4 典型信号处理实例 .....             | 10 |
| 1.4.1 远程通信 .....               | 10 |
| 1.4.2 回声定位 .....               | 11 |
| 1.4.3 图像处理 .....               | 12 |
| 1.4.4 柴油发动机信号 .....            | 13 |
| 1.4.5 时间序列 .....               | 14 |
| 1.5 典型信号处理应用 .....             | 14 |
| 1.5.1 CD 数字音频系统 .....          | 14 |
| 1.5.2 电话拨号应用 .....             | 15 |
| 1.5.3 自适应滤波器 .....             | 16 |
| 1.5.4 电话网络中的回声消除 .....         | 17 |
| 1.6 数字信号处理与模拟信号处理的比较 .....     | 19 |
| 1.7 关于 MATLAB 及其工具箱的一些说明 ..... | 21 |

## 第2章 离散时间信号与系统 ..... 23

|                     |    |
|---------------------|----|
| 2.1 离散时间信号 .....    | 23 |
| 2.1.1 序列的类型 .....   | 23 |
| 2.1.2 序列运算 .....    | 28 |
| 2.1.3 信号分解 .....    | 29 |
| 2.1.4 离散序列的应用 ..... | 29 |
| 2.2 离散时间系统 .....    | 32 |
| 2.2.1 离散时间运算 .....  | 33 |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 2.2.2 离散系统的分类 .....        | 34 |
| 2.3 序列的卷积和相关 .....         | 38 |
| 2.3.1 卷积和 .....            | 38 |
| 2.3.2 序列的相关 .....          | 44 |
| 2.3.3 卷积与相关的关系 .....       | 47 |
| 2.4 差分方程 .....             | 47 |
| 2.4.1 $N$ 阶输入/输出差分方程 ..... | 48 |
| 2.4.2 差分方程的求解 .....        | 48 |
| 2.5 零输入和零状态响应 .....        | 50 |
| 2.6 数字滤波器 .....            | 50 |
| 2.6.1 FIR 滤波器 .....        | 51 |
| 2.6.2 IIR 滤波器 .....        | 52 |
| 2.6.3 递归与非递归滤波器的关系 .....   | 53 |
| 2.7 单位样值响应 .....           | 54 |
| 2.8 离散时间系统的应用 .....        | 55 |
| 2.8.1 QQQQ 股票数据的处理 .....   | 55 |
| 2.8.2 噪声数据的抑制 .....        | 57 |
| 2.8.3 平方根的工程计算 .....       | 59 |
| 习题 .....                   | 60 |

## 第3章 离散时间傅里叶分析 ..... 62

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 3.1 离散时间傅里叶变换 .....               | 62 |
| 3.2 DTFT 的性质 .....                | 64 |
| 3.3 DTFT 的周期性和对称性 .....           | 65 |
| 3.4 系统函数 .....                    | 71 |
| 3.4.1 定义 .....                    | 71 |
| 3.4.2 相位延迟和群延迟 .....              | 72 |
| 3.4.3 逆频率响应 .....                 | 73 |
| 3.5 滤波器 .....                     | 73 |
| 3.6 系统的互联 .....                   | 74 |
| 3.7 信号和系统中的 DTFT .....            | 75 |
| 3.7.1 线性时(移位)不变系统和线性常系数差分方程 ..... | 75 |
| 3.7.2 相关和卷积的频率响应 .....            | 77 |
| 3.7.3 逆系统 .....                   | 78 |
| 3.7.4 模拟信号的采样和重构 .....            | 79 |
| 3.8 DTFT 的应用 .....                | 84 |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 3.8.1 采样对频域各量的影响 .....     | 84 |
| 3.8.2 内插技术在信号重构方面的应用 ..... | 84 |
| 3.8.3 在低通滤波器中的应用 .....     | 89 |
| 习题 .....                   | 95 |

## 第4章 $z$ 变换 .....

|                                                      |     |
|------------------------------------------------------|-----|
| 4.1 双边 $z$ 变换 .....                                  | 97  |
| 4.2 收敛域 .....                                        | 99  |
| 4.3 DTFT 与 $z$ 变换的关系 .....                           | 102 |
| 4.4 双边 $z$ 变换的性质 .....                               | 102 |
| 4.5 常用序列的 $z$ 变换 .....                               | 104 |
| 4.6 零点、极点和 $z$ 平面 .....                              | 106 |
| 4.7 逆 $z$ 变换 .....                                   | 108 |
| 4.7.1 部分分式展开法 .....                                  | 108 |
| 4.7.2 幂级数展开法 .....                                   | 109 |
| 4.7.3 用 MATLAB 函数 residue 和 residuez 求逆 $z$ 变换 ..... | 109 |
| 4.8 系统(传递)函数 .....                                   | 111 |
| 4.8.1 系统描述的不同形式 .....                                | 112 |
| 4.8.2 有理系统函数的系统响应 .....                              | 113 |
| 4.8.3 系统的暂态响应和稳态响应 .....                             | 114 |
| 4.8.4 因果性和稳定性 .....                                  | 114 |
| 4.8.5 频率响应函数 .....                                   | 115 |
| 4.9 单边 $z$ 变换 .....                                  | 116 |
| 4.9.1 单边 $z$ 变换的定义 .....                             | 116 |
| 4.9.2 单边 $z$ 变换的右移性质 .....                           | 117 |
| 4.9.3 单边 $z$ 变换的左移性质 .....                           | 118 |
| 4.10 双边 $z$ 变换和单边 $z$ 变换的关系 .....                    | 119 |
| 4.11 $z$ 变换的应用 .....                                 | 120 |
| 4.11.1 正弦输入的响应 .....                                 | 120 |
| 4.11.2 噪声序列的滤波 .....                                 | 121 |
| 4.11.3 MACD 决策 .....                                 | 124 |
| 习题 .....                                             | 127 |

## 第5章 离散傅里叶变换及快速算法 .....

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 5.1 离散傅里叶级数 .....      | 130 |
| 5.1.1 离散傅里叶级数的定义 ..... | 130 |
| 5.1.2 离散傅里叶级数的计算 ..... | 131 |
| 5.1.3 离散傅里叶级数的性质 ..... | 133 |
| 5.2 离散傅里叶变换 .....      | 134 |
| 5.2.1 DFT 的定义 .....    | 134 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 5.2.2 DFT、DTFT 和 $z$ 变换的关系 ..... | 137 |
| 5.2.3 采样周期、记录长度及频率分辨率 .....      | 137 |
| 5.2.4 正弦函数形式 .....               | 138 |
| 5.3 DFT 的性质 .....                | 140 |
| 5.4 关于 DFT 的几点认识 .....           | 148 |
| 5.5 用 DFT 计算线性卷积 .....           | 149 |
| 5.5.1 用 DFT 计算线性卷积的步骤 .....      | 149 |
| 5.5.2 重叠相加法 .....                | 150 |
| 5.5.3 重叠保留法 .....                | 151 |
| 5.6 计算 DFT 的快速算法——FFT .....      | 152 |
| 5.6.1 DFT 直接运算的计算量 .....         | 152 |
| 5.6.2 快速算法 .....                 | 153 |
| 5.6.3 基本结果 .....                 | 153 |
| 5.6.4 FFT 与 DFT 的比较 .....        | 154 |
| 5.7 DFT 及 FFT 的应用 .....          | 155 |
| 5.7.1 用 FFT 计算傅里叶变换 .....        | 155 |
| 5.7.2 双音多频信号的检测 .....            | 158 |
| 5.8 太阳黑子活动周期的分析 .....            | 161 |
| 5.9 股票趋势分析 .....                 | 164 |
| 习题 .....                         | 167 |

## 第6章 数字滤波器的结构 .....

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 6.1 引言 .....               | 169 |
| 6.2 IIR 滤波器的结构 .....       | 170 |
| 6.2.1 直接型 .....            | 170 |
| 6.2.2 级联型 .....            | 172 |
| 6.2.3 并联型 .....            | 175 |
| 6.3 FIR 滤波器的结构 .....       | 180 |
| 6.3.1 直接型 .....            | 181 |
| 6.3.2 级联型 .....            | 181 |
| 6.3.3 线性相位型 .....          | 181 |
| 6.3.4 频率采样型 .....          | 183 |
| 6.4 格型滤波器的结构 .....         | 185 |
| 6.4.1 全零点格型滤波器 .....       | 186 |
| 6.4.2 全极点格型滤波器 .....       | 189 |
| 6.4.3 IIR 格型滤波器 .....      | 189 |
| 6.5 IIR 和 FIR 滤波器的选择 ..... | 191 |
| 习题 .....                   | 192 |

## 第7章 IIR 滤波器的设计 .....

|              |     |
|--------------|-----|
| 7.1 引言 ..... | 194 |
|--------------|-----|

|                                           |     |                               |     |
|-------------------------------------------|-----|-------------------------------|-----|
| 7.1.1 设计过程 .....                          | 194 | 8.6.3 任意响应 FIR 滤波器的设计 .....   | 275 |
| 7.1.2 数字滤波器的设计考虑 .....                    | 194 | 习题 .....                      | 277 |
| 7.1.3 IIR 滤波器设计 .....                     | 194 | <b>第9章 自适应滤波及应用</b> .....     | 279 |
| 7.1.4 相对线性尺度 .....                        | 195 | 9.1 自适应滤波的概念 .....            | 279 |
| 7.1.5 $ H_a(j\Omega) ^2$ 的性质 .....        | 196 | 9.2 自适应 LMS 滤波器 .....         | 280 |
| 7.2 模拟滤波器的原型 .....                        | 196 | 9.2.1 均方误差性能度量 .....          | 280 |
| 7.2.1 巴特沃思滤波器 .....                       | 197 | 9.2.2 梯度和 Wiener 解 .....      | 282 |
| 7.2.2 切比雪夫滤波器 .....                       | 199 | 9.2.3 最陡下降法 .....             | 283 |
| 7.2.3 椭圆滤波器 .....                         | 202 | 9.2.4 LMS 算法 .....            | 285 |
| 7.2.4 滤波器原型的相位响应 .....                    | 202 | 9.2.5 LMS 算法的收敛性分析 .....      | 287 |
| 7.3 模拟-数字滤波器变换 .....                      | 203 | 9.2.6 LMS 算法的实现 .....         | 287 |
| 7.3.1 脉冲响应不变法 .....                       | 203 | 9.2.7 学习曲线和时间常数 .....         | 288 |
| 7.3.2 双线性变换法 .....                        | 205 | 9.2.8 稳态误差与失调系数 .....         | 288 |
| 7.4 频率转换 .....                            | 207 | 9.2.9 LMS 算法小结 .....          | 289 |
| 7.5 IIR 滤波器的设计技术 .....                    | 208 | 9.3 几种改进的 LMS 算法 .....        | 289 |
| 7.5.1 噪声抑制应用 .....                        | 210 | 9.3.1 正规 LMS 算法 .....         | 290 |
| 7.5.2 应用讨论 .....                          | 212 | 9.3.2 梯度自适应步长算法 .....         | 290 |
| 7.5.3 基于 MATLAB 函数的 IIR 滤波器<br>设计技术 ..... | 212 | 9.3.3 自动增益控制自适应算法 .....       | 291 |
| 7.5.4 基于滤波器设计及分析工具的设<br>计技术 .....         | 221 | 9.3.4 符号-误差 LMS 算法 .....      | 291 |
| 7.6 典型 IIR 滤波器的比较 .....                   | 223 | 9.3.5 符号-数据 LMS 算法 .....      | 291 |
| 习题 .....                                  | 225 | 9.3.6 数据复用 LMS 算法 .....       | 292 |
| <b>第8章 FIR 滤波器的设计</b> .....               | 228 | 9.3.7 其他自适应滤波器 .....          | 292 |
| 8.1 对称序列与线性相位 .....                       | 228 | 9.4 自适应滤波的应用 .....            | 293 |
| 8.2 FIR 滤波器 .....                         | 239 | 9.4.1 LMS 线性预测 .....          | 293 |
| 8.2.1 FIR 滤波器的设计指标 .....                  | 239 | 9.4.2 自适应干扰抵消 .....           | 293 |
| 8.2.2 基于窗函数的设计 .....                      | 241 | 9.4.3 自适应信道均衡 .....           | 298 |
| 8.2.3 窗函数和设计参数的选择 .....                   | 249 | 9.4.4 平稳信道估计 .....            | 299 |
| 8.3 频带变换 .....                            | 252 | 9.4.5 地球物理勘探中的自适应<br>模拟 ..... | 301 |
| 8.4 频率采样滤波器的设计 .....                      | 254 | 9.4.6 胎儿心电图中的噪声抑制 .....       | 303 |
| 8.5 等波纹线性相位滤波器的设计 .....                   | 255 | 9.4.7 回声消除 .....              | 306 |
| 8.6 基于 MATLAB 函数的滤波器设<br>计技术 .....        | 256 | 9.5 讨论 .....                  | 313 |
| 8.6.1 MATLAB 滤波器设计函数 .....                | 256 | 附录 一个实现 LMS 算法的快速算法 .....     | 314 |
| 8.6.2 基于可视化计算的滤波器设<br>计技术 .....           | 271 | <b>参考文献</b> .....             | 316 |

# 第 1 章 信号和信号处理

数字信号处理 (Digital Signal Processing, DSP) 是当前科学和工程最强有力的支持技术之一。它已在非常广泛的领域中取得了革命性的进展: 语音处理、数字通信、医学影像、雷达、声纳、控制、石油勘探、人口统计以及金融、证券等。毋庸置疑, DSP 在这些应用中的每个方面都形成了自成体系的数学需求、算法设计和特殊应用技术, 因而在理论和应用的深度和广度上造成了初学者很难全面理解和掌握最新的 DSP 技术。显而易见, DSP 的教程应包括两方面的任务: 一是学习 DSP 涉及的重要概念、基本理论和方法; 二是学习应用于某一专业领域的某一特殊算法或者技术。

本章概述数字信号处理的基本概念和方法。首先介绍信号的数学特性及信号的分类; 随后详细讨论一些典型信号和信号所承载信息的种类; 然后回顾一些常用的信号处理技术; 最后是一些典型信号处理应用举例。

## 1.1 数字信号处理的起源

数字信号处理不同于一般学科领域的是它所涉及的特殊数据类型——信号。通常, 这些信号来源于现实世界中的各种传感器数据, 如地震波形、大气压力、视频流、医学影像、遥测、遥感, 以及无线电波等。DSP 就是在这些信号被获取并被转换成数字形式之后, 对其进行特殊运算或处理的一项技术, 事实上可以将其认为是数学和算法的一种特殊运用。这种数学和算法的运用包含了多种意图或目的, 如提高视频流的播放质量、语音识别及合成、数据压缩和信号重构等。假如我们给计算机接入一个数据采集器用以采集外部数据 (如心电图数据等), 随后的任务是什么呢? 至少有一点可以明确, 不论下面你干什么, 肯定离不开 DSP。

DSP 起源于 20 世纪 60 ~ 70 年代, 当时数字计算机已初步具备大规模进入科研和工业领域的基本条件。虽然那时的计算机还十分昂贵, DSP 也只有一些有限的应用, 但在下面 4 个关键领域却取得了开创性的成就:

- (1) 雷达和声纳 源于冷战时期东西方对峙导致的军备竞赛和关于国家安全的考虑。
- (2) 石油勘探 对能源需求的快速增长导致大量地震勘探数据的处理需求。
- (3) 空间探测 捕获的珍贵数据不可能再次得到。
- (4) 医学图像 出于拯救生命的需要。

到了 20 世纪 80 ~ 90 年代, 这种应用上的需求已经不再被政府和军事的需求所拉动, 因为个人计算机的革命开始促使人们尝试用 DSP 技术对新的应用进行积极的探索。于是 DSP 的发展突然间被广阔的应用前景和良好的商业投资所驱动, 如蜂窝移动电话、CD 播放机和语音电子邮件等。

在大学教育方面情况也大致如此, 20 世纪 80 年代, DSP 课程还仅仅出现在研究生教学计划中; 从 20 世纪 90 年代开始, DSP 成为本科教学计划中标准专业技术课程的一部分。今

天, DSP 更是众多领域的科学家和工程师们应该或必须掌握的一项基本技能。其发展的形式可以和以前的一项技术革命相提并论, 那就是电子学。尽管电子学仍然属于电子工程的范畴, 但现在几乎每个科学家和工程师都应该具备电路设计的基本知识和技能。可以说, 没有了电子学的基本背景, 科学家和工程师们将会在技术的世界中迷失方向, DSP 也同样如此。

由此可见, DSP 是一门建立在众多领域应用背景之中的交叉学科, 而且它们之间的界限并不非常明显。了解 DSP 的发展历史对于学习和应用 DSP 会产生巨大的影响。假设读者面对一个数字信号处理方面的问题需要找到解决方案, 查阅资料之后, 他找到的很可能是一页接一页的数学公式、不太好懂的数学符号和陌生的技术术语。事实上, DSP 方面的很多资料即使是对那些在这一领域很有经验的人来说也是困难的。这倒不是说这些技术文献本身有什么问题, 而是因为这些文献确实是为一些专业读者所准备的。因为科学家需要这种高深的数学理论来阐述其工作的理论意义, 而工程师需要这种详细的数学理论来理解这项工作的应用前景。

## 1.2 信号的特征和分类

根据自变量的特性和函数值来定义信号。例如, 自变量可以是连续变量或离散变量。这样, 信号就可以被划分为连续信号或离散信号。此外, 信号还可以被分为实值信号和复值信号。

信号可以由一个或多个信号源产生。前者是一个标量信号, 而后者一般是一个矢量信号或称作多路信号。

一维信号 (1-D) 是拥有一个自变量的函数, 二维信号 (2-D) 是拥有两个自变量的函数, 多维信号 (M-D) 是拥有一个以上自变量的函数。例如, 语音信号是典型的以时间为自变量的一维信号; 一幅照片是以二维空间为自变量的二维信号。黑白视频信号的每一帧是一个二维图像信号, 它是二维离散空间变量的函数; 又因为它的每一帧都以固定 (离散) 的时间间隔顺序出现, 因此, 黑白视频信号可以被认为是一个三维信号的例子 (三个自变量分别是两个空间变量加一个时间变量)。彩色视频信号是由 3 个分别代表三基色 (红、绿、蓝, RGB) 的三维信号组成的。为了方便传输, RGB 电视信号通常被转换成一种由亮度分量和两个色度信号分量组成的三通道信号。

当信号的自变量取确定值时, 信号的取值就被称作幅值。信号的幅值随自变量的变化而变化, 这种变化的图形描述称作信号的波形。

对于一维信号, 自变量通常被标定为时间。如果自变量是连续的, 信号就被称为连续时间信号。如果自变量是离散的, 信号则被称为离散时间信号。连续时间信号在时间坐标的每一点上都有定义, 而离散时间信号则在时间坐标的离散点上才有定义, 因此, 它是一个时间序列。

具有连续幅值的连续时间信号一般被称作模拟信号, 它在现实世界中随处可见。语音信号是典型的模拟信号。用有限数字描述的具有离散幅值的离散时间信号被称为数字信号, 如 MP3 格式的数字音频信号等。另外, 时间上离散、幅值上连续的信号被称作抽样信号。数字信号是被量化的抽样信号。最后, 具有离散幅值的连续时间信号可以被看成是量化的矩形信号。

在数学表示上可以清楚地看到信号的函数相关性。对于一维连续时间信号, 其自变量通

常用时间  $t$  表示；对一维离散时间信号，其自变量一般用时间的离散值  $n$  表示。这样， $u(t)$  代表一维连续时间信号，而  $\{v(n)\}$  表示一维离散时间信号序列， $\{v(n)\}$  中的每一个元  $v(n)$  是离散时间信号的一个样本。在许多应用中，离散时间信号是由连续时间信号在归一化时间区间上抽样产生的。如果离散时间信号的时间间隔是均匀分布的，那么离散时间自变量  $n$  可以被归一化为整数值。

在二维连续时间信号中，自变量一般是空间坐标，可用  $x$  和  $y$  表示。例如，一幅黑白图像的亮度可以用  $u(x, y)$  表示，而一幅数字化图像则是二维离散时间信号，它的两个自变量是离散的空间坐标变量  $m$  和  $n$ ，因此，数字图像可以用  $v(m, n)$  表示。同样，黑白视频信号是三维信号，可用  $u(x, y, t)$  表示，这里  $x$ 、 $y$  分别代表两个空间坐标变量，而  $t$  代表时间变量。彩色视频信号是由代表红、绿、蓝三基色的 3 个信号分量组成的信号向量。

$$\mathbf{u}(x, y, t) = \begin{pmatrix} r(x, y, t) \\ g(x, y, t) \\ b(x, y, t) \end{pmatrix}$$

信号还可以根据其统计特性来分类。其中可以用数学表达式、规则或表查寻来完全描述的信号被称为确定性信号；而那些随机产生的，或者不可预测的信号则被称为随机信号。本书中主要讨论确定性离散时间信号。然而，由于实际离散时间系统使用有限字长来存储信号以及实现信号处理算法，研究有限字长对于离散时间系统的影响就变得尤为重要。现已发现，把一些相关信号表示为随机信号并用统计学方法进行分析有其方便之处。

## 1.3 典型信号运算

在实际应用中，需要对各种信号进行形式多样的处理和操作。对于模拟信号，大部分信号处理的运算都在时域中进行；但离散时间信号的运算却可以在时域，亦可以在频域中进行。信号的运算往往可以通过一些基本运算关系的组合实时实现，若有需要，也可以非实时即离线实现。

### 1.3.1 基本时域操作

最基本的时域信号运算是比例（或加权）、时延和叠加运算。

1) 比例运算是用一个正或负的常数乘以信号。对于模拟信号，如果这个常数的模大于 1，则这种运算称为放大；反之称为衰减。如果  $x(t)$  是一个模拟信号，比例运算将产生一个新的信号  $y(t) = \alpha x(t)$ ，其中  $\alpha$  是常数。

2) 时延运算是原信号经过延时环节后产生的新信号。假如一个模拟信号  $x(t)$  延时  $t_0$ ，则产生一个新的信号  $y(t) = x(t - t_0)$ 。如果  $t_0 > 0$ ，定义为前向（或右移）运算；如果  $t_0 < 0$ ，则定义为后向（或左移）运算。

3) 叠加运算是两个或两个以上信号的线性组合运算，如

$$y(t) = x_1(t) + x_2(t) - x_3(t)$$

的运算。

### 1.3.2 滤波

滤波是一种广泛应用于复杂信号处理的过程或运算。滤波通常是指信号经过一个系统时允许某些频率成分无失真通过，同时滤除信号的其他频率成分的过程或操作。信号无失真通

过的频段通常被定义为信号的通带，信号被滤除的频段被定义为信号的阻带。通常，应用于模拟信号的滤波器是线性的，且可以用卷积积分描述

$$y(t) = h(t) * x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau)x(\tau) d\tau \tag{1-1}$$

式中， $x(t)$ 是滤波器的输入信号； $h(t)$ 是滤波器的单位冲激响应； $y(t)$ 是滤波器的输出信号。

低通滤波器允许所有低于某一特定频率 $f_c$ 的低频信号通过，同时滤除高于频率 $f_c$ 的所有信号，频率 $f_c$ 被称为截止频率。高通滤波器与低通滤波器的作用相反，它允许所有高于某一特定频率 $f_c$ 的（高频）信号通过，并且滤除低于这一频率的所有信号。带通滤波器允许频率成分在两个截止频率 $f_{c1}$ 和 $f_{c2}$  ( $f_{c1} < f_{c2}$ ) 之间的信号通过，并且滤除这个频段之外的所有信号。带阻滤波器则滤除两个截止频率 $f_{c1}$ 和 $f_{c2}$  ( $f_{c1} < f_{c2}$ ) 之间的频率成分，并允许这个频段之外的所有信号通过。

图 1-1 给出了由 5Hz、15Hz 和 30Hz 正弦信号组合的信号，右图从上到下依次给出该组合信号通过上述 4 种滤波器滤波的结果。其中低通滤波器的截止频率为 40rad/s，高通滤波器的截止频率为 140rad/s，带通滤波器和带阻滤波器的上下截止频率均为 40rad/s 和 140rad/s。

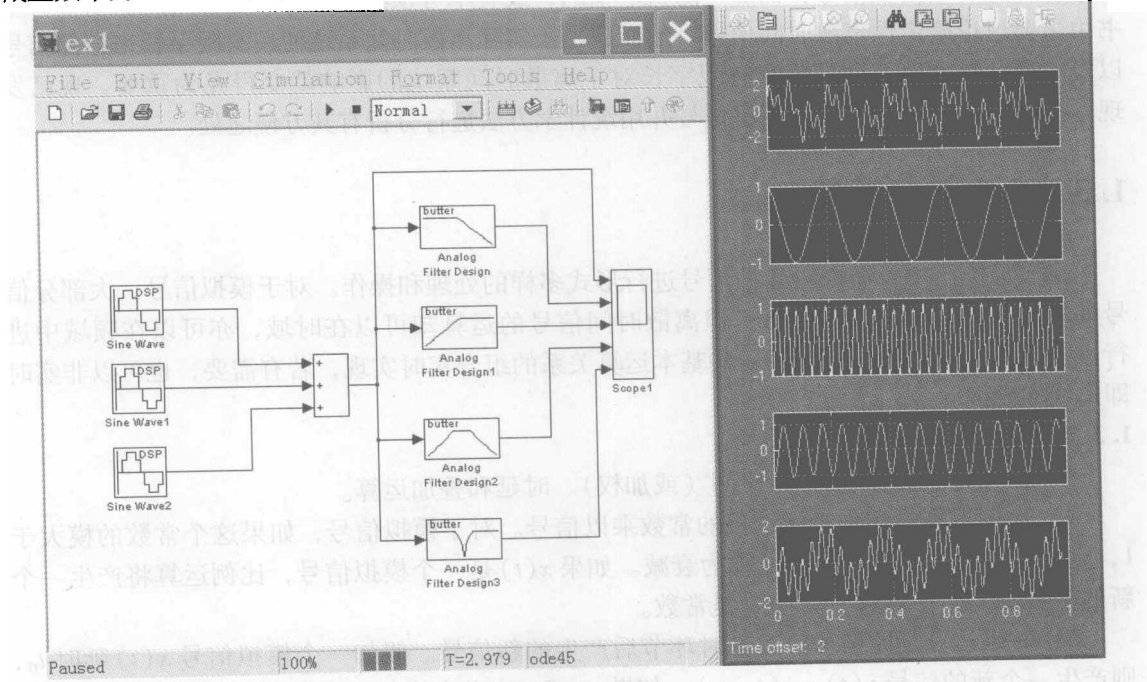


图 1-1 混合信号及其滤波

对某个特殊频率成分进行滤除的带阻滤波器称为陷波滤波器。而多频带滤波器有多个通带和多个阻带。梳状滤波器则滤除一个低频信号的整数倍频率。

信号可能会受到有意或无意的不期望信号的影响。这种不期望的信号常被称为干扰或噪声信号。在很多应用中，期望信号往往占据了从直流到某一频率为 $f_L$ 的低频带部分，而这个信号可能被一个频率为 $f_H$  ( $f_H > f_L$ ) 的高频噪声所干扰。这时，若使被噪声污染的信号通过一个截止频率为 $f_c$  ( $f_L < f_c < f_H$ ) 的低通滤波器，则可以恢复为原来的信号。通常，公共的噪

声源是电源线辐射的电磁波。由电源线产生的噪声表现为频率 50Hz 或者 60Hz 的正弦波信号, 被这种噪声干扰的信号可以使其通过陷波频率为 50Hz 或 60Hz 的陷波滤波器来滤除噪声。

### 1.3.3 复信号的产生

如前所述, 信号可分为实信号和复信号。所有物理产生的信号都是实信号。但在某些应用中, 需要将实信号转换成复信号, 以便获取信号更为详尽的信息。由于因果性的限制, 可对实信号  $x(t)$  求其 Hilbert 变换, 也就是使  $x(t)$  通过一个传输函数为  $H_{HT}(j\omega)$  的系统来求得这个信号的 Hilbert 变换。其中  $H_{HT}(j\omega)$  为

$$H_{HT}(j\omega) = -j\operatorname{sgn}(j\omega) = \begin{cases} -j, & \omega > 0 \\ j, & \omega < 0 \end{cases} \quad (1-2)$$

它的冲激响应为

$$h_{HT}(t) = \frac{1}{\pi t} \quad (1-3)$$

$x(t)$  的连续傅里叶变换为

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1-4)$$

式中,  $X(j\omega)$  也称为信号  $x(t)$  的频谱。实信号的幅度频谱为偶对称, 而相位频谱为奇对称。因此, 实信号  $x(t)$  的频谱  $X(j\omega)$  既包含正频率, 又包含负频率, 可以表示为

$$X(j\omega) = X_p(j\omega) + X_n(j\omega) \quad (1-5)$$

式中,  $X_p(j\omega)$  是  $X(j\omega)$  中包含正频率范围的部分;  $X_n(j\omega)$  是  $X(j\omega)$  中包含负频率范围的部分。

如果信号  $x(t)$  经过 Hilbert 变换, 则其输出  $\hat{x}(t)$  可由  $x(t)$  和  $h_{HT}(t)$  的线性卷积描述, 即

$$\hat{x}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_{HT}(t-\tau) x(\tau) d\tau \quad (1-6)$$

$\hat{x}(t)$  的频谱  $\hat{X}(j\omega)$  则由  $x(t)$  和  $h_{HT}(t)$  的连续傅里叶变换的乘积给出, 即

$$\hat{X}(j\omega) = H_{HT}(j\omega) X(j\omega) = -jX_p(j\omega) + jX_n(j\omega) \quad (1-7)$$

由于  $\hat{X}(j\omega)$  的幅度和相位分别是偶函数和奇函数, 则由上式知,  $\hat{x}(t)$  也是实信号。

实信号  $x(t)$  的解析信号  $x_a(t)$  定义为

$$x_a(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (1-8)$$

解析信号  $x_a(t)$  的实部  $x(t)$  和虚部  $\hat{x}(t)$  互为 Hilbert 变换。例如, 实信号  $x(t) = \cos\omega t$  的解析信号为

$$x_a(t) = x(t) + j\hat{x}(t) = \cos\omega t + j\sin\omega t = e^{j\omega t}$$

通过对解析信号  $x_a(t) = x(t) + j\hat{x}(t)$  取傅里叶变换, 利用式 (1-4) 和式 (1-7), 可以得到

$$\begin{aligned} X_a(j\omega) &= X(j\omega) + j[-j\operatorname{sgn}(j\omega)]X(j\omega) \\ &= X(j\omega)[1 + \operatorname{sgn}(j\omega)] = \begin{cases} 2X(j\omega), & \omega > 0 \\ 0, & \omega < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (1-9)$$

显然, 解析信号只有正频率分量。

### 1.3.4 调制和解调

在长距离信号传输中采用的传输媒介通常是电缆、光缆 (有线) 或者大气 (无线)。每

种传输媒介针对不同频率的信号都存在一个能够有效传输信号的带宽。因此,为了通过信道传输低频信号,首先必须利用调制技术把低频信号转换成高频信号。在信号的接收端,再对这种已调高频信号进行解调,经进一步处理后,就可以得到我们需要的低频信号。实际应用中一般采用4种模拟信号调制方法:幅度调制、频率调制、相位调制和脉冲幅度调制。其中,幅度调制概念上比较简单,将作为重点介绍。

在幅度调制模式中,高频正弦信号  $A\cos(\omega_0 t)$  (称为载波信号) 的幅度随低频带限信号  $x(t)$  (称为调制信号) 的变化而变化,由此产生的高频信号 (称为已调信号) 为

$$y(t) = Ax(t) \cos(\omega_0 t) \quad (1-10)$$

因此,幅度调制可以用调制信号和载波信号的乘积来实现。为了说明幅度调制的频率变换特性,令带限 (或调制) 信号  $x(t) = \cos(\omega_1 t)$ , 其中  $\omega_1 \ll \omega_0$ 。从式 (1-10) 可以得到

$$\begin{aligned} y(t) &= A\cos\omega_1 t \cos\omega_0 t \\ &= \frac{A}{2} \cos(\omega_0 + \omega_1)t + \frac{A}{2} \cos(\omega_0 - \omega_1)t \end{aligned} \quad (1-11)$$

可以看出,已调信号  $y(t)$  由两个频率分别为  $\omega_0 + \omega_1$  和  $\omega_0 - \omega_1$  的正弦波信号组成。由于  $\omega_1 \ll \omega_0$ , 所以这两个频率更接近载频  $\omega_0$ 。

信号  $y(t)$  的频谱具有重要意义。从它的连续时间傅里叶变换性质考虑,可以得到

$$Y(j\omega) = \frac{A}{2} X[j(\omega - \omega_0)] + \frac{A}{2} X[j(\omega + \omega_0)] \quad (1-12)$$

式中,  $X(j\omega)$  是调制信号  $x(t)$  的频谱。

图 1-2 给出了幅度调制的框图以及调制信号、载波信号和已调信号的波形。

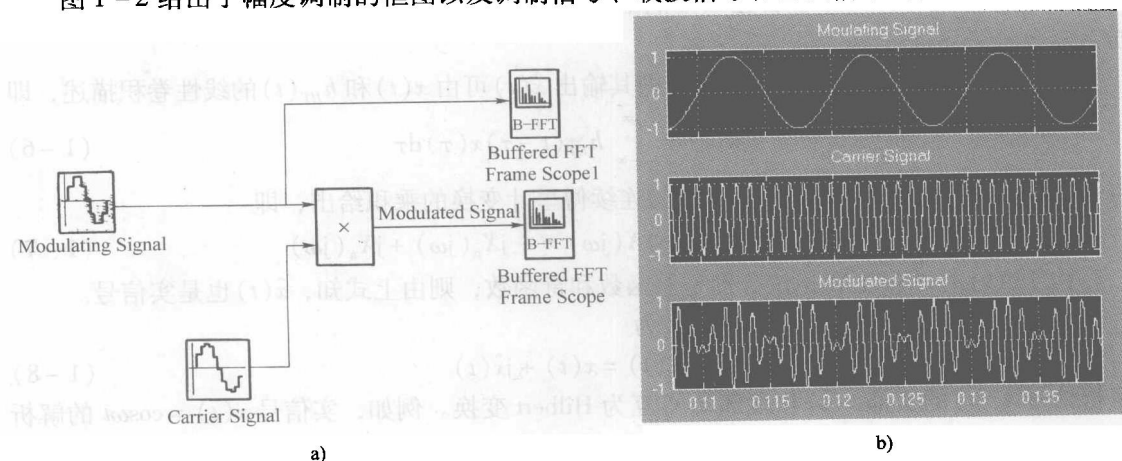


图 1-2 幅度调制的框图以及调制信号、载波信号和已调信号的波形

a) 幅度调制的框图 b) 信号波形

图 1-3 给出了当  $\omega_0 \gg \omega_m$  时, 调制信号和已调信号的频谱。从中可以看出, 已调信号  $y(t)$  是一个以  $\omega_0$  为中心频率, 带宽为  $2\omega_m$  的带限高频信号。

已调幅信号在  $\omega_0$  和  $\omega_0 + \omega_m$  的部分被称为上边带, 在  $\omega_0$  和  $\omega_0 - \omega_m$  的部分被称为下边带。由于在已调信号中产生了两个边带并且没有了载波成分, 所以这种调制被称为双边带抑制载波调制 (DSB-SC)。

假设  $\omega_0 > \omega_m$ , 对信号  $y(t)$  的解调可以分两步实现: 首先, 用  $y(t)$  和一个与载波信号同频率的正弦波信号相乘, 即