

国外电子与通信教材系列

Mc
Graw
Hill
Education

Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach
Fourth Edition

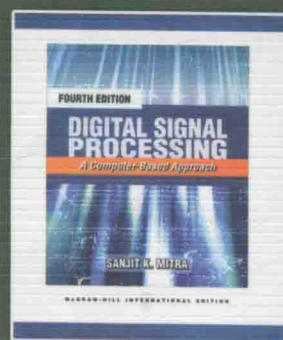
数字信号处理

—— 基于计算机的方法

(第四版)

[美] Sanjit K. Mitra 著

余翔宇 译



中国工信出版集团



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

国外电子与通信教材系列

数字信号处理

——基于计算机的方法(第四版)

Digital Signal Processing

A Computer-Based Approach

Fourth Edition

[美] Sanjit K. Mitra 著

余翔宇 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是数字信号处理领域的经典教材 Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach, Fourth Edition 的中文翻译版,内容涵盖了信号与信号处理、时域中的离散时间信号、频域中的离散时间信号、离散时间系统、有限长离散变换、 z 变换、变换域中的 LTI 离散时间系统、数字滤波器结构、IIR 数字滤波器设计、FIR 数字滤波器设计、DSP 算法实现等方面。本书的特点是,在讲解上述内容的同时,给出了大量简单而实用的例子,并用 MATLAB 程序进行了验证,同时提供了大量的高质量习题和仿真练习。

本书可作为高等院校电子信息类专业高年级本科生或研究生的教材,也可供有关技术、科研管理人员使用,或作为继续教育的参考书。

Sanjit K. Mitra.

Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach, Fourth Edition

ISBN: 0-07-736676-X. Copyright © 2011 by McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2018 by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和电子工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内(不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾地区)销售。

版权 © 2018 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与电子工业出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2011-3678

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理:基于计算机的方法:第四版/(美)桑吉特·K.米特拉(Sanjit K. Mitra)著;余翔宇译.

北京:电子工业出版社,2018.6

书名原文:Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach, Fourth Edition

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-33921-9

I. ①数… II. ①桑… ②余… 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(2018)第 060684 号

策划编辑:冯小贝

责任编辑:冯小贝

印 刷:辽宁泰阳广告彩色印刷有限公司

装 订:辽宁泰阳广告彩色印刷有限公司

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:42.25 字数:1377 千字

版 次:2005 年 1 月第 1 版(原著第 2 版)

2018 年 6 月第 3 版(原著第 4 版)

印 次:2018 年 6 月第 1 次印刷

定 价:99.00 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, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:fengxiaobei@phei.com.cn。

译 者 序

Sanjit K. Mitra 教授的《数字信号处理——基于计算机的方法》一书,最早由清华大学出版社于 2001 年 9 月以影印版的形式引入中国。为了让更多的中国读者能够分享这本世界知名的教材,电子工业出版社及时地购买了该书的翻译版权,分别于 2005 年初和 2006 年中先后推出该书的第二版和第三版的中译版,满足了国内教学和科研的需要。该书由于其通俗性及与 MATLAB 紧密的融合等优点,逐渐成为国内大学中最受欢迎的数字信号处理外版书籍。

2011 年初,麦格劳-希尔教育出版公司再次在全球推出该书的第四版。全书的翻译基本延续了前两版的风格,同时对于专业词汇,均重新参考了相应的专业书籍,力求更加准确。此外,对于书后参考文献中在国内已经有出版的书籍均给出了说明,尽管其中有些已经绝版,但仍然可以在各大高校的图书馆中借阅。

本书第二版由余翔宇初译全书,再由孙洪教授组织师生修改,最后由孙教授修正、定稿。第三版由孙洪教授组织师生翻译,并由孙教授定稿。第四版在本人第二版译稿的基础上,对照第二版与第四版的差异,并参考第三版中译版的相关内容逐句改译、增译而成。因此,第四版中译本乃集合了诸多前人智慧之结晶,由于人数众多,不便在此一一列举,具体名单可参阅第二版及第三版的译者序。在本次翻译过程中,刘文杨同学协助给出了第四版部分新增内容的初译,我的父亲余伯庸先生利用退休后的闲暇时间帮我录入了书中的公式并检查了文稿中的错漏处,帮我减轻了一定的工作量。

非常感谢孙洪教授给本人提供参与翻译此书第二版的机会。也要感谢电子工业出版社高教分社的谭海平社长力邀,使我能与此书再次结缘。还要感谢华南理工大学电子与信息学院“数字信号处理”国家级精品课程的负责人韦岗教授及主要授课教师金连文教授、傅予力教授在百忙之中审阅了本书译稿。麦格劳-希尔教育出版公司北京办事处的古丽婵女士和香港办事处的张俊文先生在本书的翻译过程中提供了不少帮助,尤其是在 2011 年 6 月 Mitra 教授访华期间积极安排与他的会面,在此一并感谢。

由于本人水平有限,加之翻译时间仓促,书中错误在所难免,欢迎各位同行和同学批评指正。

译者

前 言

半个世纪以来,数字信号处理(DSP)领域发展迅猛,在研究和应用方面都取得了显著的进展。数字计算机技术和软件开发的进展推动了其发展。现在,几乎全球所有的电气和计算机工程系都开设了一门或几门数字信号处理方面的课程,最初的课程通常在大学本科四年级开设。本书旨在作为大学本科四年级和研究生一年级学生共两学期的数字信号处理课程的教材,同样也适用于工程技术人员或科研人员自学。

本书第三版在2006年出版,从读者的反馈来看,显然需要一个新的版本来包含那些所建议的变化。对于本书前一版主要有三类变动:包括了大量新主题,删除了一些内容,并对内容进行了重新组织。我们认为调整后的每一章更具逻辑性。另外,加入了一些新的带有解答的例题来解释那些难以理解的新概念。

第四版的主要变化之一是,将原第2章、第3章和第4章的内容重新调整为三个新的章节:一章是离散时间信号的时域表示,一章是离散时间信号的频域表示,另一章则是离散时间系统的时域和频域表示。第三版第4章中关于模拟低通、高通、带通和带阻滤波器设计,模拟抗混叠滤波器设计,以及模拟重构滤波器设计等几节,在第四版中已移至两个附录中。此外,删除了对实际中连续时间信号数字处理所需接口设备(抽样-保持电路、模数转换器和数模转换器)的讨论。

第四版第二个主要变化是删除了关于应用的一章,而将该章中的绝大部分材料收录于随书附带的光盘^①中。关于短时傅里叶变换的讨论也从该章移到了新版本中讨论有限长离散变换的第5章中。

第四版中的新内容包括:循环前缀(5.10.2节)、数字积分器(7.4.3节)、数字微分器(7.4.4节)、直流阻断器(7.4.5节)、以级联格型结构形式实现一对FIR传输函数的新方法(8.9节)、IIR数字滤波器的计算机辅助设计内容(9.7节)、为计算上有效的内插FIR滤波器设计确定最优稀疏因子的方法(10.6.2节)、使用转置运算生成的快速DFT计算算法(11.3.3节)。上一版有关数字正余弦发生器设计的一节,已从第8章中删除,转而作为该章末尾的习题。第11章中关于可调谐数字滤波器设计的内容,已移至讨论数字滤波器实现的章节(8.7节)中。最后,关于算术运算和函数逼近的几节已从第11章中删除,而关于某些函数逼近的一些问题则在该章末尾以习题的形式出现。

本书的主要特点之一是,大量使用基于MATLAB^②的例题来示例程序在求解信号处理问题上的强大功能。本书采用了一种三步教学法结构,从而充分利用了MATLAB的优势,避免了采用“食谱”式方法解题的弊端。每一章首先从讨论基本理论和算法开始;接下来给出一些人工求解计算的实例;最后用MATLAB推演题解。从一开始就尽量提供详细的MATLAB代码,以便学生自己的计算机上重复这些例子。在每一章中,除了对常规理论问题要求分析求解之外,还包含了大量需要使用MATLAB来求解的问题。本书只需要学生掌握初步的MATLAB知识。我们相信学生通过使用验证过的完整程序,可以加快掌握解决复杂问题的能力,随后就可以编写一些简单的程序来求解指定的问题(这些问题列在第2章到第14章的末尾)。

由于计算机的验证可以增强对基本理论的理解,所以与前三版一样,第四版给出了一个庞大的MATLAB程序库。第三版原有的MATLAB程序都已进行了升级,以便适用于MATLAB和信号处理工具箱的新版本。另外,在第四版中加入了新的MATLAB程序及其代码段。所有的程序都列在本书附带的光盘中。学生可以运行这些程序来验证书中的结果。教材中的所有程序和代码段已在MATLAB 7.10.0.499(R2010a)及信号处理工具箱6.13(R2010a)版本下测试过。本书中所列出的一些程序就执行速度而言,可能不一定是最快的,其代码量也不一定是最短的,但在没有详细解释的情况下是用最容易理解的方式编写的。

本书的另一大特点是,包含了大量简单却很实用的例子。这些例子向读者展示了实际生活中的数字

① 随书附带的光盘内容已上传至华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>),有兴趣的读者可免费下載——编者注。

② MATLAB是MathWorks公司的注册商标,该公司的网址是<http://www.mathworks.com>。

信号处理问题,我们可以使用计算机来解决这些实际问题。本书还包含了当前未出现在教材中的一些热门主题。第2章到第14章后面的习题向读者介绍了其他一些主题。

本书附带的光盘中包含几个重要的数字信号处理应用。这些应用易于理解,不要求读者具有其他高级课程的知识。光盘还包含其他一些有用的材料,如表示实信号的文件、复习材料、其他例题、常见问题解答(FAQ)、大量数字信号处理的典型应用及简短的 MATLAB 指南。在教材中,我们尽可能地用光盘符号为读者指出光盘中的相关资料。希望读者的反馈能帮助我们在将来的版本中改进光盘的内容。

本书的先修课程是大学三年级关于线性连续时间和离散时间系统的课程,这在绝大部分学校都是必修课。本书简要复习了线性系统及其变换,包括线性系统理论的基本内容;其中重要的内容用表格进行总结。这样,就可以在不明显增加教材篇幅的情况下,包含较多的深入内容。

本书由14章和3个附录组成。第1章介绍信号处理,并概述信号和信号处理方法。

第2章讨论将离散时间信号在时域中表示成数字序列。首先,介绍在任意离散时间信号和离散时间系统的时域描述中起着重要作用的几个基本离散时间信号。接着,描述了大量由一个或更多序列生成其他序列的基本运算。这些运算的组合还将用来构造离散时间系统,而用离散时间序列表示连续时间信号的问题仅作为简单情况来研究。

第3章讨论离散时间信号的频域表示。本章首先简要回顾连续时间信号的连续时间傅里叶变换(CTFT)表示。然后,引入用于在频域中表示离散时间信号的离散时间傅里叶变换(DTFT),接着介绍离散时间傅里叶逆变换,用以将原始离散时间信号从其DTFT表示中恢复出来。由于DTFT表示涉及一个无限求和,因此也对DTFT的收敛性进行了探讨。接下来,回顾了DTFT的属性,探讨消除DTFT中某些不连续性的相位函数的展开。最后,推导带限连续时间信号在理想抽样情况下的离散时间表示及从抽样精确恢复信号的条件。

第4章首先介绍一些简单离散时间系统的时域表示及其应用,然后探讨各种类别的离散时间系统,其中本书重点考察因果、线性和时不变(LTI)系统。这里表明因果LTI离散时间系统的时域表示是根据其冲激响应进行的,从该冲激响应可以得到系统的输入/输出关系。之后讨论通过互连几个简单的LTI系统来生成更复杂的LTI系统。LTI离散时间系统的频域表示是其频率响应,它就是系统冲激响应的DTFT。接下来引入频率响应的概念,并仔细分析与频率响应相关的相位延迟和群延迟之间的差别。

第5章主要讨论离散傅里叶变换(DFT),由于可以用快速算法来有效地实现线性卷积,DFT在一些数字信号处理应用中起着重要的作用。首先引入DFT及其逆变换,然后讨论其性质。本章还概述了离散余弦变换(DCT)和Haar变换。上面讨论的所有三种变换都是有限长序列的正交变换的例子。此外,本章还简要回顾了短时傅里叶变换,这种变换通常用于提供非确定离散时间信号的频域表示。

第6章讨论 z 变换。首先引入 z 变换及其逆变换,并且讨论其性质。然后详细讨论 z 变换的收敛条件,之后讨论LTI离散时间系统的传输函数的概念及其与系统频率响应的关系。

如前所述,本书基本上只涉及LTI离散时间系统,第7章讨论该系统的变换域表示。此外,还将讨论这些变换域表示的特有性质,以及一些简单的应用。

硬件或软件实现LTI数字滤波器的第一步是由几个基本模块互连起来的结构描述。结构描述可以揭示一些固有的内部变量与输入/输出之间的关系,这是系统实现的关键。数字滤波器有多种结构描述,第8章将讨论其中的两种描述形式,然后讨论实现实因果IIR和FIR数字滤波器的一些常用方案。

第9章探讨IIR数字滤波器的设计问题。首先,讨论滤波器设计的相关问题。然后,描述设计IIR滤波器的最常用方法,即基于将原型模拟传输函数转换成数字传输函数的方法。此外,还将讨论经过谱变换把一类IIR传输函数变换成另一类函数,最后介绍了用MATLAB设计IIR数字滤波器。

第10章讨论FIR滤波器的设计问题。首先描述一种非常简单的FIR滤波器设计方法,然后讨论用计算机辅助来设计等波纹线性相位FIR数字滤波器的常用方法。最后,讨论用MATLAB设计FIR数字滤波器。

第11章涉及DSP算法的实现。首先讨论涉及实现的两个主要问题。通过在计算机上对数字滤波和对DFT算法进行软件实现的过程,说明其要点。接着讨论数字设备中数字和信号变量的各种表示方法,这些是在第12章中所讨论的有限字长效应分析方法的基础。最后,简要介绍用于处理溢出的运算。

第 12 章分析不同来源量化误差的影响,描述对这些影响敏感度较小的结构。此外,还将讨论系数量化的影响。

第 13 章和第 14 章讨论多抽样率离散时间系统,即在不同部分使用不同抽样率的系统。本章概述抽样率变换的基本概念和特性,数字滤波器的抽取和内插的设计,以及多抽样率滤波器组的设计。

附录 A 简单介绍模拟低通滤波器的设计方法,以及设计模拟抗混叠滤波器和模拟重构滤波器的要求。附录 B 讨论模拟高通、带通和带阻滤波器的设计方法。附录 C 回顾随机变量和随机过程的重要统计特性。

本书的内容已在加州大学圣·巴巴拉分校用于两个学期的数字信号处理课程,并经过了课堂上超过 20 年的仔细检验。基本框架是,从第 2 章到第 8 章的内容对应本科高年级的基础课程,第 8 章到第 14 章的内容及一些应用例题则对应研究生课程。此外,本书的主要部分过去几年来也一直用于南加州大学的本科高年级课程。

本书包含了 324 个例题、146 个 MATLAB 程序和代码段、845 个习题及 158 个 MATLAB 练习。

我们已尽最大努力保证本书中所有材料(包括 MATLAB 程序)的准确性。然而,也非常感激读者指出本书中出现的任何笔者和出版社都未发现的错误。对于这些错误和建议,读者可以通过电子邮件的方式和笔者交流,其电子邮件地址是 mitra@ece.ucsb.edu。

本书的网址为 www.mhhe.com/mitra,上面包含了面向教师和其他资源。教师可受益于麦格劳-希尔教育出版公司的 COSMOS 电子解答手册。COSMOS 可使教师随心所欲地生成习题,并将自己的习题传输及整合到该软件中。进一步的信息可与麦格劳-希尔教育出版公司的销售代表联系^①。

最后,非常荣幸在教学生涯中能有机会与我的研究小组中杰出的学生一起工作长达 40 多年。在和他们的交流与合作中,本人已经并将继续受益匪浅,谨以此书向他们表示衷心的感谢。

Sanjit K. Mitra

^① 有关教学辅助资源的获取方法请参阅书后所附的“教学支持说明”——编者注。

致 谢

本书第一版的完整初稿经过了下述博士的审阅:克罗地亚萨格勒布大学的 Hrvoje Babic, 杜克大学的 James F. Kaiser, 奥地利维也纳理工大学的 Wolfgang F. G. Mecklenbräuker, 加州理工大学的 P. P. Vaidyanathan。草稿经过了下述博士的审阅:微软公司的 Roberto H. Bambmerger, 普渡大学的 Charles Boumann, 明尼苏达大学的 Kevin Buckley, 得克萨斯农工大学的 John A. Flemming, 加州大学圣·巴巴拉分校的 Jerry D. Gibson, 所罗门大学的 John Gowdy, 加州理工州立大学圣·路易斯·奥比斯保分校的 James Harris 和 Mahmood Nahvi, 波特兰州立大学的 Yih-Chyun Jenq, 加州大学圣迭哥分校的 Troung Q. Ngyuen, 亚利桑那州立大学的 Andreas Spanias。该书稿的许多内容还经过了如下博士的审阅:莱斯大学的 C. Sidney Burrus, AT&T 实验室的 Richard V. Cox, 加州大学圣迭哥分校的 Ian Galton, 乔治亚理工大学的 Nikil S. Jayant, 挪威科技大学的 Tor Ramstad, 赖特州立大学的 B. Ananth Sheno, 德国埃朗根-纽伦堡大学的 Hans W. Schüssler, 俄勒冈州立大学的 Richard Schreier 和 Gabor C. Temes。

第二版经过了如下博士的审阅:北卡罗来纳州立大学的 Winser E. Alexander, 罗切斯特工学院的 Sohail A. Dianat, 印度理工学院的 Suhash Dutta Roy, 北达科他州立大学的 David C. Farden, 苏丹卡布斯大学的 Abdulnasir Y. Hossein, 杜克大学的 James F. Kaiser, 安捷伦实验室的 Ramakrishna Kakarala, 奥地利维也纳理工大学的 Wolfgang F. G. Mecklenbräuker, 南加州大学的 Antonio Ortega, 奥本大学的 Stanley J. Reeves, 马里兰大学的 George Symos, 麻省理工学院的 Gregory A. Wornell。第二版手稿的许多内容还受到了如下博士的审阅:哥伦比亚大学的 Dimitris Anastassiou, 佛罗里达州立大学的 Rajendra K. Arora, 罗德岛大学的 Ramdas Kumaresan, 加州大学圣·巴巴拉分校的 Upamanyu Madhow, 纽约布鲁克林理工学院的 Ivan Selesnick, 俄勒冈州立大学的 Gabor C. Temes。

第三版经过了如下博士的审阅:新西兰梅西大学的 Donald G. Bailey, 意大利罗马第三大学的 Marco Carli, 明尼苏达大学的 Emad S. Ebbini, 塔斯基吉大学的 Chandrakanth H. Gowda, 得克萨斯大学奥斯汀分校的 Robert W. Heath, 史蒂文斯理工学院的 Hongbin Li, 加州大学河滨分校的 Ping Liang, 俄勒冈州立大学的 Luca Lucchese, 迈阿密大学的 Kamal Premaratne, 罗格斯大学的 Lawrence R. Rabiner, 威斯康星州密尔沃基大学的 Ali M. Reza, 新奥尔良大学的 Terry E. Riemer, 得克萨斯农工大学的 Erchin Serepdin, 阿克伦大学的 Okechukwu C. Ugweje。第三版手稿的许多内容还受到了如下博士的审阅:加州大学圣·巴巴拉分校的 Shivkumar Chandrasekaran, 新墨西哥州立大学(拉斯库鲁斯校区)的 Charles D. Creusere, 新加坡南洋理工大学的林永青和马凯光, MathWorks 有限公司的 Ricardo Losada, 斯坦福大学的 Julius O. Smith, 加州大学圣迭哥分校的 Truong Nguyen。这里我要感谢他们有价值的意见, 这些意见无疑对本书非常有用。

第三版的修订意见由如下博士提供:泰国诗琳通国际理工学院的 Chalie Charoenlarnnoppa, 比利时 Katholieke 高等专业学院(Associatie K. U. Leuven)的 Patrick Coleman, 新墨西哥州立大学(拉斯库鲁斯校区)的 Charles D. Creusere, 纽约伦斯勒理工学院的 Alan A. Desrochers, 印度 Aligarh 穆斯林大学的 Omar Farooq, 印度果阿大学的 Rajendra S. Gad, 印度理工学院孟买分校的 Vikram M. Gadre, 印度卡利卡特国立工学院的 E. Gopinathan, 马来西亚多媒体大学的林行祥, 新西兰奥克兰理工大学的 Hamid Gholam Hosseini, 印度喀拉拉邦 Thangal Kunju Musaliar 工程学院的 Abdul Jaleel, 马来西亚 Putra 大学的 Sabira Khatun, 中国山东大学的刘璐, 哥伦比亚特区大学的 Wagdy H. Mahmoud, 印度 Vishwakarma 工学院的 Ashutosh Marathe, 印度理工学院孟买分校的 S. N. Merchant, 巴基斯坦 Riphah 国际大学的 Muhammad Javed Mirza, 印度 Hamirpur 国立理工学院的 Ravinder Nath, 印度理工学院马德拉斯分校的 K. M. M. Prabhu, 印度国立理工大学卡利卡特分校的 S. M. Sameer, 印度国立理工大学古鲁格舍德拉分校的 O. P. Sahu, 北伊利诺伊大学的 Mansour Tahernezehadi, 泰国朱拉隆功大学的 Nisachon Tangsangiumvisai, 巴基斯坦卡拉奇计算机与前沿科学 FAST 国立大学的 Imran A. Tasadduq。

第四版的手稿由奥地利维也纳理工大学的 Wolfgang F. G. Mecklenbräuer 博士及加州大学圣迭哥分校的 Truong Nguyen 博士审阅。第四版的部分手稿还得到了印度理工学院新德里分校的 Suhash Dutta Roy 博士审阅。

这里我要感谢他们有价值的建议,这些建议无疑对本书非常有用。

我的许多学生审阅了所有版本的各种手稿,并测试了许多 MATLAB 程序。我尤其要感谢 Charles D. Creusere 博士、Rajeev Gandhi 博士、Gabriel Gomes 博士、Serkan Hatipoglu 博士、何志海博士、何昕瀚博士、Michael Lightstone 博士、林应松博士、Luca Lucchese 博士、Michael Moore 博士、Debargha Mukherjee 博士、Norbert Strobel 博士、Stefan Thurnhofer 博士、Mylene Queiroz de Farias 博士以及 Eric Leipnik 先生。我还要感谢加州大学圣·巴巴拉分校 ECE 158 和 ECE 258A 课程的学生,以及南加州大学 EE 483 课程的学生,感谢他们几年来的反馈,这些反馈帮助我使这本书增色不少。

感谢 Goutam K. Mitra 和 Alicia Rodriguez 为本书设计了封面。最后,我要感谢 Patricia Monohon 为本书的第四版精心准备 LaTeX 文件。

书中包含的所有 MATLAB 程序均可在本书附带的光盘中找到,也可以通过网站 www.ece.ucsb.edu/Faculty/Mitra/Book4e 获得。

教师可通过出版商获得由何昕瀚、Travis Smith 和 Martin Gawecki 准备的习题解答手册,其中包含了所有习题及 MATLAB 练习的答案,也可通过与作者联系得到书中大部分内容的 PowerPoint 幻灯片。

作者简介

Sanjit K. Mitra: 美国南加州大学洛杉矶分校谢明电气工程系的 Stephen and Etta Varra 教授,加州大学圣·巴巴拉分校电气与计算机工程系研究员。分别于 1960 年和 1962 年获得加州大学伯克利分校电气工程专业硕士和博士学位。曾以不同身份为 IEEE 服务,包括担任 1986 年 IEEE 电路与系统学会主席,1996 年至 1999 年 IEEE 信号处理学会主席团成员。他在模拟与数字信号处理、图像处理领域发表了 660 多篇论文,出版了 12 本图书,并拥有 5 项专利。在工业和学术领域,Mitra 博士获得了许多荣誉,包括 1973 年的 F. E. Terman 奖,1985 年美国工程教育学会的 AT&T 基金奖,1989 年的教育奖,1999 年 Mac Van Valkenburg 学会奖和 IEEE 电路与系统学会 CAS50 周年奖,1989 年的德国亚历山大·范·洪保基金会著名美国科学家奖;IEEE 信号处理学会 1995 年技术成就奖,2001 年学会奖,2006 年教育奖;IEEE 2005 年千禧奖,2006 年小詹姆斯·H·马利根教育奖;信号处理欧洲学会(EURASIP)2002 年技术成就奖,2009 年 Athanasios Papoulis 奖,2005 年的国际光学工程学会 SPIE 技术成就奖,2005 年的斯洛文尼亚 Slova 工学院 Bratislava 分校大学奖。他是 2000 年 IEE(伦敦)Blumlein-Browne-Willans 奖及 2001 年 IEEE 视频技术电路与系统汇刊最佳论文的获得者。同时,他是美国工程院院士,芬兰科学院院士,挪威科学与技术学院院士,克罗地亚科学与艺术学院外籍成员,墨西哥工程院外籍成员,印度工程院外籍院士,印度科学院外籍院士。曾被授予芬兰坦佩雷工学院、罗马尼亚布加勒斯特理工大学、罗马尼亚雅西工学院荣誉博士学位。Mitra 博士是 IEEE、AAAS、SPIE 会士,同时也是 EURASIP 会员。

目 录

第 1 章 信号和信号处理	1	4.4 LTI 离散时间系统的时域特性	107
1.1 信号的特征与分类	1	4.5 简单互连方案	113
1.2 典型的信号处理运算	2	4.6 有限维 LTI 离散时间系统	114
1.3 典型信号举例	8	4.7 LTI 离散时间系统的分类	121
1.4 典型的信号处理应用	14	4.8 LTI 离散时间系统的频域表示	122
1.5 为什么要进行数字信号处理	24	4.9 相位延迟和群延迟	130
第 2 章 时域中的离散时间信号	27	4.10 小结	133
2.1 时域表示	27	4.11 习题	133
2.2 序列的运算	30	4.12 MATLAB 练习	139
2.3 有限长序列的运算	36	第 5 章 有限长离散变换	140
2.4 典型序列与序列表示	41	5.1 正交变换	140
2.5 抽样过程	48	5.2 离散傅里叶变换	141
2.6 信号的相关	50	5.3 DTFT 与 DFT 及其逆之间的关系	145
2.7 随机信号	54	5.4 圆周卷积	149
2.8 小结	55	5.5 有限长序列的分类	152
2.9 习题	55	5.6 DFT 对称关系	156
2.10 MATLAB 练习	59	5.7 离散傅里叶变换定理	158
第 3 章 频域中的离散时间信号	61	5.8 傅里叶域滤波	162
3.1 连续时间傅里叶变换	61	5.9 计算实序列的 DFT	163
3.2 离散时间傅里叶变换	64	5.10 用 DFT 实现线性卷积	165
3.3 离散时间傅里叶变换定理	72	5.11 短时傅里叶变换	173
3.4 离散时间序列的能量密度谱	76	5.12 离散余弦变换	176
3.5 带限离散时间信号	77	5.13 Haar 变换	181
3.6 用 MATLAB 计算 DTFT	78	5.14 能量压缩性质	184
3.7 展开相位函数	78	5.15 小结	185
3.8 连续时间信号的数字处理	79	5.16 习题	186
3.9 带通信号的抽样	90	5.17 MATLAB 练习	195
3.10 抽样和保持运算的效果	91	第 6 章 z 变换	197
3.11 小结	92	6.1 定义	197
3.12 习题	92	6.2 有理 z 变换	200
3.13 MATLAB 练习	99	6.3 有理 z 变换的收敛域	201
第 4 章 离散时间系统	100	6.4 逆 z 变换	204
4.1 离散时间系统举例	100	6.5 z 变换定理	210
4.2 离散时间系统的分类	104	6.6 有限长序列卷积的计算	217
4.3 冲激和阶跃响应	107	6.7 传输函数	218

6.8	小结	227	9.7	IIR 数字滤波器的计算机辅助设计	365
6.9	习题	227	9.8	小结	368
6.10	MATLAB 练习	236	9.9	习题	368
第 7 章	变换域中的 LTI 离散时间系统	237	9.10	MATLAB 练习	372
7.1	基于幅度特征的传输函数分类	237	第 10 章	FIR 数字滤波器设计	374
7.2	基于相位描述的传输函数分类	243	10.1	预备知识	374
7.3	线性相位 FIR 传输函数的类型	248	10.2	基于加窗傅里叶级数的 FIR 滤波器设计	377
7.4	简单数字滤波器	256	10.3	等波纹线性相位 FIR 滤波器的计算机辅助设计	388
7.5	互补传输函数	269	10.4	设计最小相位 FIR 滤波器	394
7.6	逆系统	273	10.5	用 MATLAB 设计数字滤波器	395
7.7	系统识别	276	10.6	计算高效的 FIR 数字滤波器的设计	406
7.8	数字二端口网络	279	10.7	小结	416
7.9	代数稳定性测试	280	10.8	习题	416
7.10	小结	284	10.9	MATLAB 练习	422
7.11	习题	284	第 11 章	DSP 算法实现	425
7.12	MATLAB 练习	295	11.1	基本问题	425
第 8 章	数字滤波器结构	297	11.2	用 MATLAB 进行结构仿真和验证	433
8.1	框图表示	297	11.3	计算离散傅里叶变换	438
8.2	等效结构	299	11.4	基于序号映射的快速 DFT 算法	449
8.3	基本 FIR 数字滤波器结构	300	11.5	用 MATLAB 计算 DFT 和 IDFT	455
8.4	基本 IIR 数字滤波器结构	304	11.6	滑动离散傅里叶变换	456
8.5	用 MATLAB 实现基本结构	308	11.7	在窄频带上计算 DFT	457
8.6	全通滤波器	310	11.8	数字表示	460
8.7	参数可调谐低通 IIR 数字滤波器对	317	11.9	溢出的处理	463
8.8	IIR 抽头级联格型结构	319	11.10	小结	464
8.9	FIR 级联格型结构	322	11.11	习题	464
8.10	IIR 传输函数的并联全通实现	327	11.12	MATLAB 练习	470
8.11	可调谐数字滤波器	331	第 12 章	有限字长效应的分析	472
8.12	数字滤波器结构的计算复杂度	336	12.1	量化过程和误差	472
8.13	小结	336	12.2	定点数的量化	473
8.14	习题	337	12.3	浮点数的量化	475
8.15	MATLAB 练习	345	12.4	系数量化效应的分析	475
第 9 章	IIR 数字滤波器设计	347	12.5	A/D 转换噪声分析	483
9.1	预备知识	347	12.6	算术舍入误差分析	490
9.2	IIR 滤波器设计的双线性变换法	350	12.7	动态范围缩放	492
9.3	设计低通 IIR 数字滤波器	354	12.8	低阶 IIR 滤波器的信噪比	500
9.4	高通、带通和带阻 IIR 数字滤波器设计	355	12.9	低灵敏度数字滤波器	503
9.5	IIR 滤波器的谱变换	358			
9.6	用 MATLAB 设计 IIR 数字滤波器	363			

第1章 信号和信号处理

信号在日常生活中扮演了重要的角色。常见的信号有语音、音乐、图片和视频信号等。信号是自变量(如时间、距离、位置、温度和压力等)的函数。例如,语音和音乐信号表示空间上某个点的气压,它是时间的函数;黑白图片将光强度表示为两个空间坐标的函数;电视中的视频信号由称为帧的图像序列组成,它是两个空间坐标和时间这三个变量的函数。

我们遇到的大多数信号都是自然产生的。然而,信号也可以通过人工合成或计算机仿真生成。信号携带着信息,而信号处理的目的就是提取信号所携带的有用信息。信息提取的方法取决于信号的类型以及信号中信息的本质。因此,粗略地讲,信号处理研究信号的数学表示以及用以提取信号所含信息而对信号进行的算法运算。信号可以用原自变量域中的基函数或者用变换域中的基函数表示。同样,信息提取处理可以在信号的原始域或变换域中进行。本书主要涉及信号的离散时间表示和相应的离散时间处理。

本章给出了信号和信号处理方法的概述。首先讨论信号的数学描述和信号的分类;接着,详细讨论一些典型的信号,并且描述它们所携带信息的类型,接下来通过例子给出并演示一些常用的信号处理运算;随后简要地讲述一些典型的数字信号处理应用;最后讨论数字信号处理的优点和缺点。

1.1 信号的特征与分类

根据自变量的本质以及定义该信号函数的值,可定义不同类型的信号。例如,自变量可以是连续的或离散的。同样,信号也可以是自变量的连续的或离散的函数。此外,信号可以是实值函数或一个复值函数。

信号可以由一个或多个源产生。在前一种情况下,它为标量信号;而在后一种情况下,它为向量信号,通常也称为多通道信号。一维(1-D)信号是单个自变量的函数,二维(2-D)信号是两个自变量的函数,多维(M -D)信号是多个自变量的函数。语音信号是一个一维信号,其中自变量是时间。图像信号,如照片,是一个二维信号,其中的两个自变量是空间的两个变量。黑白视频信号的每一帧是一个二维图像信号,它是两个离散空间变量的函数,每一帧在离散时间上按顺序出现。因此,黑白视频信号可以看成是一个三维(3-D)信号,其三个自变量分别是两个空间变量和一个时间变量。彩色视频信号是由分别表示红、绿、蓝(RGB)三原色的三个三维信号组成的三通道信号,在传输中,将RGB电视信号转换成由亮度分量和两个色度分量组成的另一种三通道信号。

在自变量的指定值上信号的值称为信号的**振幅**,作为自变量的函数的振幅变化称为**波形**。

对于一维信号,自变量通常为**时间**。若自变量是连续的,该信号称为**连续时间信号**;若自变量是离散的,该信号称为**离散时间信号**。连续时间信号定义在时间的每个时刻,而离散时间信号仅在特定的离散时刻取值,而在这些时刻之间,信号没有定义。因此,离散时间信号实质上是数字的一个序列。

具有连续振幅的连续时间信号通常称为**模拟信号**,语音信号就是模拟信号的一个例子。在日常生活中经常遇到的模拟信号通常以自然方式产生。用有限个数字表示离散振幅值的离散时间信号称为**数字信号**。存储在光盘中的数字化音乐信号就是一种数字信号。具有连续振幅值的离散时间信号称为**抽样数据信号**,这一类信号出现在开关电容(SC)电路中。因此,数字信号可以看成是量化后的抽样数据信号。最后,具有离散振幅值的连续时间信号称为**量化矩形窗信号**[Ste93],这种信号出现在数字电路中,其中信号在时钟的两个时刻间保持固定电平(通常是两个值之一)。图1.1示例了这四种类型的信号。

通常可以清楚地看出信号在其数学表达式中的函数依赖关系。对于一维连续时间信号,连续自变量通常用 t 表示;而对于一维离散时间信号,离散自变量通常用 n 表示。例如, $u(t)$ 表示一个一维连续时间信号,而 $\{v[n]\}$ 表示一个一维离散时间信号。离散时间信号中的每个成员 $v[n]$ 称为一个**样本**。在许多



语音
示例1



图像
示例1
视频
示例1

应用中,离散时间信号是通过将原连续时间信号以相等的时间间隔抽样产生的。若定义离散时间信号的离散时刻是等间隔的,则离散自变量 n 可以被归一化,从而取为整数。

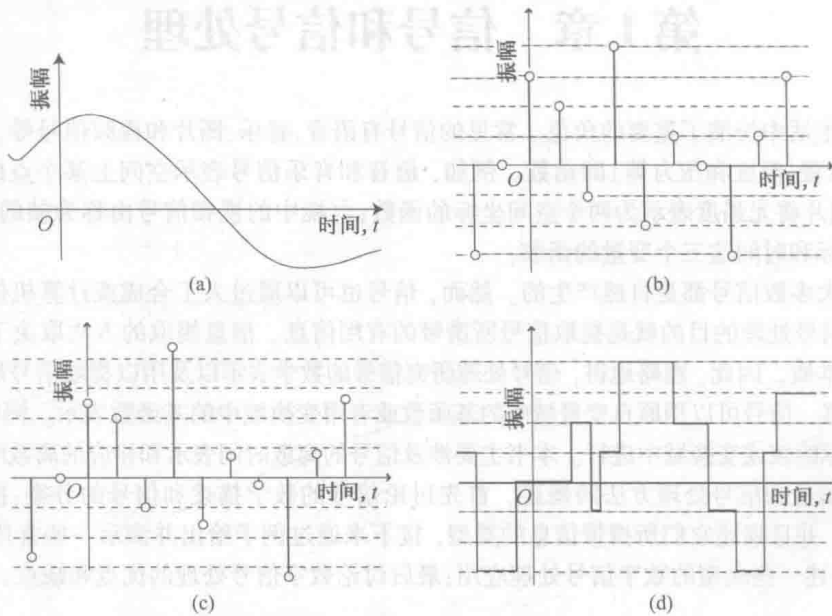


图 1.1 (a)模拟信号;(b)数字信号;(c)抽样数据信号;(d)量化矩形窗信号

对二维连续时间信号,两个自变量通常是空间坐标,常用 x 和 y 表示。例如,黑白图像的强度可以表示为 $u(x, y)$ 。彩色图像 $u(x, y)$ 由表示红、绿、蓝三原色的三个信号组成:

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

此外,数字化后的图像是二维离散信号,其两个自变量是通常表示为 m 和 n 的离散化的空间变量,因此,数字图像可以表示为 $v[m, n]$ 。同样,黑白视频序列是三维信号,可用 $u(x, y, t)$ 表示,其中 x 和 y 表示两个空间变量, t 表示时间变量。而彩色视频信号是向量信号,它由表示红、绿、蓝三原色的三个视频信号组成。

依据信号是否能被唯一地描述的确定性可对信号进行另一种分类。可由一个明确定义的过程(如通过一个数学表达式或规则,或通过查找表)来确定的信号称为**确定信号**;而一个由随机方式产生且不能提前预测的信号称为**随机信号**。本书主要探讨离散时间确定信号的处理。然而,由于实际的离散时间系统是用有限字长来存储信号和实现信号处理算法的,所以有必要提出一些工具来分析有限字长对离散时间系统性能的影响。为此,将某些相关信号表示为随机信号,并用统计的方法进行分析,就会比较方便。

下一节将介绍一些典型的作用在模拟信号上的信号处理运算。

1.2 典型的信号处理运算

在实际中使用了不同类型的信号处理运算。对模拟信号而言,大多数信号处理运算通常都在时域进行,而对离散时间信号来讲,时域和频域运算均被用到。对上述任何一种情况,所需的运算是通过一些基本运算的组合来实现的。尽管在某些应用中,这些运算可以离线实现,但它们通常还是实时的或准实时的实现。

1.2.1 简单时域运算

时域中三个最基本的信号运算是尺度缩放、延迟和相加。**尺度缩放**是直接将信号与一个正的或负的常数相乘。对模拟信号而言,若相乘常数(称为**增益**)的幅度大于1,则该运算通常称为**放大**;若相乘的常数

幅度小于1,则该运算称为**衰减**。因此,若 $x(t)$ 是一个模拟信号,则尺度缩放运算产生信号 $y(t) = \alpha x(t)$,其中 α 是尺度缩放常量。

延迟运算产生一个原信号延迟副本。对于模拟信号 $x(t)$, $y(t) = x(t - t_0)$ 是 $x(t)$ 延迟 t_0 后的信号,其中 t_0 通常被假定为一个正数。若 t_0 是负数,则对应的运算是一个**超前运算**。

许多应用需要通过两个或多个信号的运算来生成新信号。例如, $y(t) = x_1(t) + x_2(t) - x_3(t)$ 是三个模拟信号 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 和 $x_3(t)$ 通过**相加**产生的信号。另一个基本运算是两个信号的**相乘**。两个信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的相乘产生信号 $y(t) = x_1(t)x_2(t)$ 。

另外两个基本运算是**积分和微分**。模拟信号 $x(t)$ 的**积分**生成信号 $y(t) = \int_{-\infty}^t x(\tau) d\tau$,而 $x(t)$ 的**微分**得到信号 $w(t) = dx(t)/dt$ 。

上面三种基本运算,即尺度缩放、延迟和相加,也适用于离散时间信号,这将在本书后面详细讨论。另外两个运算,即积分和微分运算,在离散时间域只能近似实现。

接下来我们介绍一些通常用到的复杂信号运算,它们是通过两个或多个基本运算的组合实现的。其中有一些运算的特性通过使用连续时间傅里叶变换在频域中比较容易理解。连续时间信号 $x(t)$ 的连续时间傅里叶变换 $X(j\Omega)$ 定义为^①

$$X(j\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\Omega t} dt \quad (1.1)$$

$X(j\Omega)$ 称为 $x(t)$ 的**频谱**。

1.2.2 滤波

使用得最广泛的一种复杂信号处理运算是**滤波**,其主要目的是根据指定的要求改变频谱。实现这种运算的系统称为**滤波器**。例如,滤波器可以设计成允许信号中某些特定频率的成分通过而阻止其他频率成分。滤波器允许通过的频率范围称为**通带**,而滤波器阻止通过的频率范围称为**阻带**。根据滤波运算的性质可以定义不同的滤波器类型。在大多数情况下,模拟信号的滤波运算是线性时不变的。若滤波器用一个冲激响应 $h(t)$ 来表征,则滤波器对应于输入的输出 $y(t)$ 可以用卷积积分来描述:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau)x(\tau) d\tau \quad (1.2)$$

这里假设在输入信号作用时滤波器是零初始条件的松弛状态。在频域中,上式可表示为

$$Y(j\Omega) = H(j\Omega)X(j\Omega) \quad (1.3)$$

其中 $Y(j\Omega)$ 、 $X(j\Omega)$ 和 $H(j\Omega)$ 分别表示 $y(t)$ 、 $x(t)$ 和 $h(t)$ 的连续时间傅里叶变换。

低通滤波器允许低于某个特定频率 f_p (称为**通带边界频率**)的所有低频成分通过,并阻止所有高于 f_p (称为**阻带边界频率**)的高频成分。**高通滤波器**可通过所有高于某个通带边界频率 f_p 的高频成分,并阻止所有低于阻带边界频率 f_s 的低频成分。**带通滤波器**通过两个通带边界频率 f_{p1} 和 f_{p2} 之间的所有频率成分,其中 $f_{p1} < f_{p2}$,并阻止所有低于阻带边界频率 f_{s1} 和高于阻带边界频率 f_{s2} 的频率成分。**带阻滤波器**阻止两个阻带边界频率 f_{s1} 和 f_{s2} 之间的所有频率成分,通过所有低于通带边界频率 f_{p1} 和高于通带边界频率 f_{p2} 的频率成分。图1.2(a)显示了一个由频率分别为50 Hz、100 Hz和200 Hz的三个正弦成分组成的信号。图1.2(b)至图1.2(e)显示了上面4种类型的滤波运算经适当选择截止频率后得到的结果。

用来阻止单个频率分量的带阻滤波器称为**陷波器**。**多频带滤波器**有多个通带和多个阻带。**梳状滤波器**则设计用来阻断某个低频的整数倍的频率成分。

信号可能受到一个干扰信号(称为**干扰或噪声**)不经意地破坏。在许多应用中,期望的信号占据一个从直流(dc)到某个频率 f_L Hz的低频带,同时被一个频率成分大于 f_H Hz的高频噪声干扰,这里 $f_H > f_L$ 。此时可以将被噪声干扰的信号通过一个截止频率为 f_c 的低通滤波器来恢复期望信号,其中 $f_L < f_c < f_H$ 。在一些应

① 参见3.1节关于连续时间傅里叶变换的介绍。

用中,干扰期望信号的噪声可能是单一频率的正弦信号。例如,由电力线辐射的电磁场产生的噪声表现为一个 60 Hz 的正弦信号。将被干扰的信号通过陷波频率为 60 Hz 的陷波器,可以恢复出期望信号^①。

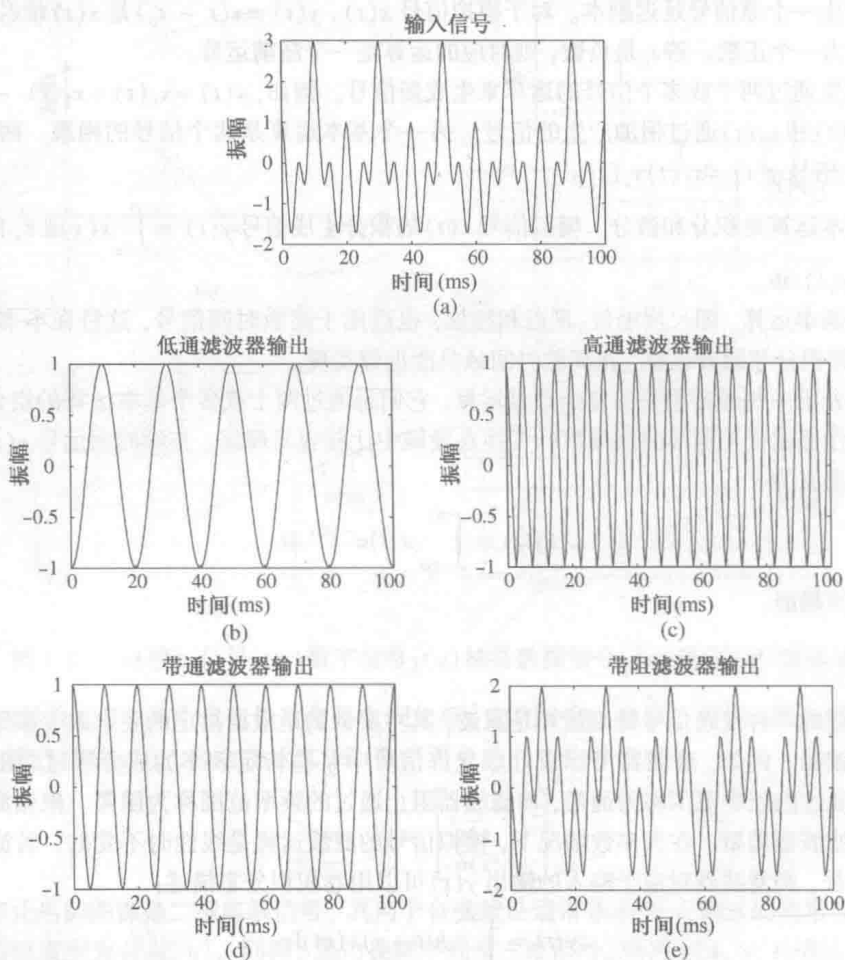


图 1.2 (a)输入信号;(b)截止频率为 80 Hz 的低通滤波器输出;(c)截止频率为 150 Hz 的高通滤波器输出;
(d)截止频率为 80 Hz 和 150 Hz 的带通滤波器输出;(e)截止频率为 80 Hz 和 150 Hz 的带阻滤波器输出

1.2.3 产生复值信号

如前所述,信号可以是实数值信号或者复数值信号。为方便起见,通常称前者为实数信号,而称后者为复数信号。所有自然产生的信号都是实值信号。在一些应用中,需要由具有更多期望性质的实数信号来生成复数信号。可以将实数信号通过希尔伯特变换器来产生复数信号,该变换由下面给出的冲激响应 $h_{HT}(t)$ 描述 [Fre94], [Opp83]:

$$h_{HT}(t) = \frac{1}{\pi t} \quad (1.4)$$

其连续时间傅里叶变换 $H_{HT}(j\Omega)$ 为

$$H_{HT}(j\Omega) = \begin{cases} -j, & \Omega > 0 \\ j, & \Omega < 0 \end{cases} \quad (1.5)$$

设 $x(t)$ 表示实数模拟信号,其连续时间傅里叶变换为 $X(j\Omega)$ 。实数信号的幅度谱具有偶对称性,而相位谱具有奇对称性。因此,实数信号 $x(t)$ 的频谱 $X(j\Omega)$ 包含了正负频率,可以表示为

^① 在许多国家(包括中国)中,电力线产生 50 Hz 的噪声。

$$X(j\Omega) = X_p(j\Omega) + X_n(j\Omega) \quad (1.6)$$

其中 $X_p(j\Omega)$ 是 $X(j\Omega)$ 的正频率部分, $X_n(j\Omega)$ 是 $X(j\Omega)$ 的负频率部分。若将 $x(t)$ 通过一个希尔伯特变换器, 则其输出 $\hat{x}(t)$ 的频谱 $\hat{X}(j\Omega)$ 可以表示为

$$\hat{X}(j\Omega) = H_{HT}(j\Omega)X(j\Omega) = -jX_p(j\Omega) + jX_n(j\Omega) \quad (1.7)$$

可以看出 $\hat{x}(t)$ 也是一个实数信号。考虑由 $x(t)$ 与 $\hat{x}(t)$ 的和组成的复数信号 $y(t)$

$$y(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (1.8)$$

信号 $x(t)$ 和 $\hat{x}(t)$ 分别称为 $y(t)$ 的同相分量和正交分量。 $y(t)$ 的连续时间傅里叶变换则可以表示为(参见习题 3.9)

$$Y(j\Omega) = X(j\Omega) + j\hat{X}(j\Omega) = 2X_p(j\Omega) \quad (1.9)$$

因此, 复数信号 $y(t)$ 称为解析信号, 它只存在正频率成分。

图 1.3 给出了从实数信号产生解析信号的框图。希尔伯特变换器的一个应用是实现单边带调制, 如图 1.8 所示, 我们将在 1.2.4 节中对其进行讨论。

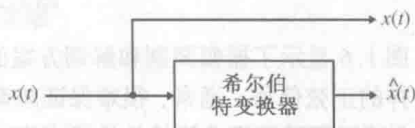


图 1.3 使用希尔伯特变换器产生解析信号

1.2.4 振幅调制

对于信号的长距离传输, 将使用诸如电缆、光纤或者大气等作为传输媒质。每种这样的媒质都在高频范围内有一个较为适合的信号有效传输的带宽。因此, 为了在信道上传输低频信号, 必须通过调制运算将信号变换成高频信号。在接收端, 对已调高频信号进行解调, 并通过后续处理提取所求的低频信号。模拟信号调制有 4 种主要的类型: 振幅调制、频率调制、相位调制和脉冲振幅调制。在这些方案中, 振幅调制的概念比较简单, 这里对其进行讨论 [Fre94], [Opp83]。

在振幅调制方案中, 载波信号是高频正弦信号 $A\cos(\Omega_o t)$, 其幅度随着的低频带限信号 $x(t)$ (称为调制信号) 变化, 按照

$$y(t) = Ax(t) \cos(\Omega_o t) \quad (1.10)$$

产生一个称为已调信号的高频信号 $y(t)$ 。因此, 振幅调制可以通过调制信号与载波信号相乘来实现。 $y(t)$ 的频谱 $Y(j\Omega)$ 可以表示为

$$Y(j\Omega) = \frac{A}{2}X(j(\Omega - \Omega_o)) + \frac{A}{2}X(j(\Omega + \Omega_o)) \quad (1.11)$$

其中 $X(j\Omega)$ 是调制信号 $x(t)$ 的频谱。图 1.4 显示了在假定载波频率 Ω_o 比包含在 $x(t)$ 中的最高频率 Ω_m 大很多的情况下, 调制信号和已调信号的频谱。从图中可以看出, $y(t)$ 是一个中心在 Ω_o 、带宽为 $2\Omega_m$ 的带限高频信号。

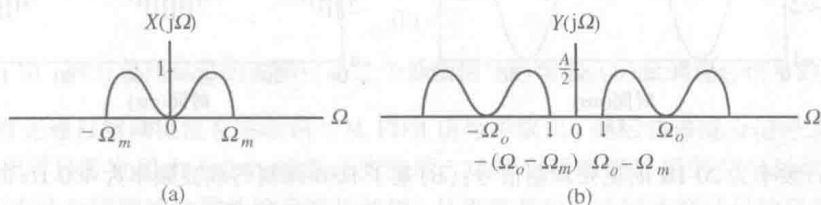


图 1.4 (a) 调制信号 $x(t)$ 的频谱及 (b) 已调信号 $y(t)$ 的频谱。为方便起见, 两个频谱都用实函数表示

调幅信号在 Ω_o 到 $\Omega_o + \Omega_m$ 之间的部分称为上边带, 而在 Ω_o 到 $\Omega_o - \Omega_m$ 之间的部分称为下边带。由于在已调信号中产生了两个边带并且没有载波成分, 所以该过程称为抑制载波双边带 (DSB-SC) 调制。

$y(t)$ 的解调分两步进行, 其中假定 $\Omega_o > \Omega_m$ 。首先将 $y(t)$ 乘以一个与载波同频的正弦信号, 其结果为

$$r(t) = y(t) \cos \Omega_o t = Ax(t) \cos^2 \Omega_o t \quad (1.12)$$

它可重写为

$$r(t) = y(t) \cos \Omega_o t = \frac{A}{2}x(t) + \frac{A}{2}x(t) \cos(2\Omega_o t) \quad (1.13)$$