


国外电子与通信教材系列

 CENGAGE
Learning

现代通信系统 (MATLAB版) (第三版)

Modern Communication Systems Using MATLAB

Third Edition

John G. Proakis
[美] Masoud Salehi 著
Gerhard Bauch

刘树棠 任品毅 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

现代通信系统

(MATLAB 版)

(第三版)

Modern Communication Systems Using MATLAB
Third Edition

John G. Proakis

[美] Masoud Salehi 著

Gerhard Bauch

刘树棠 任品毅 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书提供了利用 MATLAB 在计算机上解决“现代通信系统”课程中涉及的各方面问题的分析思路、方法、MATLAB 脚本(或程序)文件和处理结果示例,以及可供学生自主学习和研讨的习题和作业。全书内容共分 13 章,分别讨论了信号与线性系统、随机过程、模拟调制、模数转换、基带数字传输、带限信道的数字传输、载波调制的数字传输、多载波调制和 OFDM、无线信道传输、信道容量和编码、多天线系统、扩频通信系统以及数字调制方法的 Simulink 仿真指南(需通过网站下载)等。

本书适合已具备 MATLAB 基本知识的通信工程、电子工程、电气工程、计算机工程和计算机科学等专业方向的高年级本科生和研究生作为相关课程的参考书和补充教材,也可供相关专业的教师和工程技术人员参考使用。

Modern Communication Systems Using MATLAB, Third Edition

John G. Proakis, Masoud Salehi, Gerhard Bauch

刘树棠,任品毅

Copyright © 2013 by Cengage Learning.

Original edition published by Cengage Learning. All rights reserved. 本书原版由圣智学习出版公司出版。版权所有,盗印必究。

Publishing House of Electronics Industry is authorized by Cengage Learning to publish and distribute exclusively this simplified Chinese edition. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only(excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan). Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体字翻译版由圣智学习出版公司授权电子工业出版社独家出版发行。此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区及中国台湾)销售。未经授权的本书出口将被视为违反版权法的行为。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

9787121312830

Cengage Learning Asia Pte Ltd.

151 Lorong Chuan, #02-08 New Tech Park, Singapore 556741

本书封面贴有 Cengage Learning 防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2012-4457

图书在版编目(CIP)数据

现代通信系统:MATLAB 版:第三版/(美)约翰·G. 普罗克斯(John G. Proakis)等著;刘树棠,任品毅译. 北京:电子工业出版社,2017. 11

书名原文:Modern Communication Systems Using MATLAB, Third Edition

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-31283-0

I. ①现… II. ①约… ②刘… ③任… III. ①通信系统-高等学校-教材 IV. ①TN914
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 071451 号

策划编辑:马 岚

责任编辑:马 岚 特约编辑:马晓云

印 刷:北京京师印务有限公司

装 订:北京京师印务有限公司

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:27.5 字数:704 千字

版 次:2005 年 4 月第 1 版(原著第 2 版)

2017 年 11 月第 2 版(原著第 3 版)

印 次:2017 年 11 月第 1 次印刷

定 价:69.00 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:classic-series-info@phei.com.cn。

前 言

当今许多教材都讨论了模拟和数字通信系统中的基本议题,包括编码和译码算法,以及调制和解调技术。这些教材绝大部分重点关注了构成一个通信系统基本要素的各组成模块(例如编码器、译码器、调制器以及解调器)的设计及其性能分析的基础理论,只有很少一部分教材,特别是针对本科生而编写的教材,包含了一些启发学生的应用。

本书读者范围

本书旨在与任何全面介绍通信系统的教材配合使用,或作为其补充教材。本书提供了一大类可在装有通行学生版 MATLAB 的计算机(一般来说,一台个人计算机就足够了)上求解的练习。我们希望本书主要为电子工程、计算机工程和计算机科学专业的本科三年级学生以及研究生所使用。这本书对于希望学习面向通信系统的特定 MATLAB 应用的执业工程师也将是有用的。我们假定读者已经熟悉了 MATLAB 基础,书中并不涵盖这些内容,因为已有多本 MATLAB 教程和手册可用。

经过精心的设计,通信理论议题的讨论较简短。书中给出了每个议题的动机和简短介绍,建立起必要的符号表示,然后通过例子说明基本观点。主要教材和教师则应能为每个议题提供必需的深度。例如,我们介绍了匹配滤波器和相关器,并声明这些器件可以实现被高斯白噪声污染的信号的最优解调,但并不提供这一声明的证明。大部分通信系统核心教材中通常都会给出这样的证明。

新版特色

- 增加了三章全新的内容:OFDM、多天线系统以及衰落信道中的数字传输。
- 收录了真实生活中更现实的工程问题新例子,以帮助学生在进入工业界时能够更好地胜任工作。这也会帮助使用本书的执业工程师更好地了解通信系统。
- 增加了一些新的小节,分别讨论了 DPCM、ADPCM 和 DM,turbo 码和译码,以及 LDPC 码和译码。
- 第三版已更新为兼容新版 MATLAB。
- 修订更新过的 Simulink 仿真指南及教程现在可在线获取。

本书组织结构

本书共包含 13 章。前两章关注信号与线性系统以及随机过程,提供在通信系统的学习中通常所需的基本背景。其中第 3 章关注模拟通信技术,第 4 章讨论模数转换,第 5 章至第 12 章则关注数字通信。在配套网站上给出了第 13 章,即数字调制方法的 Simulink 仿真指南。

第 1 章:信号与线性系统

本章回顾线性系统分析中的基本工具和技术,包括时域和频域特性。我们重点强调频域分析技术,因为这些技术在讨论通信系统时最常用到。

第 2 章:随机过程

本章描述产生随机变量和随机过程采样的方法。议题包括指定概率分布函数的随机变量的产生,高斯及高斯-马尔可夫过程采样的产生,以及平稳随机过程在时域及频域的特征。本章还讨论了通过 Monte Carlo 仿真来估计概率。

第 3 章:模拟调制

本章探讨在噪声存在和不存在情况下的模拟调制和解调技术的性能。所研究的系统包括幅度调制(AM)方案,如双边带幅度调制、单边带幅度调制和常规幅度调制,以及角调制方案,如频率调制和相位调制。

第 4 章:模数转换

本章探讨将模拟信号源高效转换为数字序列的各种方法。这个转换过程允许我们数字化地传输或存储信号。本章讨论了有损数据压缩方案,例如脉冲编码调制(PCM)、差分 PCM 和 delta 调制,以及无损数据压缩,例如哈夫曼编码。本章也对矢量量化和 K-means 算法进行了描述和仿真。

第 5 章:基带数字传输

本章介绍高斯信道中传输数字信息所使用的基带数字调制和解调技术。我们考虑了二进制和非二进制调制技术,描述了这些信号的最优解调并评估最优解调器的性能。

第 6 章:带限信道的数字传输

本章讨论带限信道的表征和针对这类信道的信号波形设计问题。我们展示了信道色散会导致符号间干扰(ISI),从而引起信号解调错误。随后,我们探讨了补偿信道色散的信道均衡器设计。

第 7 章:载波调制的数字传输

本章讨论四类适用于带通信道传输的载波调制信号:幅度调制信号、正交幅度调制信号、相移键控和频移键控。

第 8 章:多载波调制和 OFDM

本章探讨在通信信道中使用频分复用的数字信息传输。信道的带宽被分为很多子带,并通过在每个子带上调制子载波来传输信号。通过采用在时间上同步的子载波调制,子载波信号相互正交,从而形成一个正交频分复用信号(OFDM)。本章中讨论的议题包括 OFDM 信号的产生和解调、OFDM 信号的频谱特性、抑制信道色散的循环前缀的使用,以及限制 OFDM 信号峰均比的方法。

第9章:无线信道中的数字传输

本章关注由随机时变和时域色散的脉冲响应表征的无线通信信道中的数字信号传输。讨论的议题包括频率选择和非频率选择瑞利衰落信道模型的特征、多普勒功率谱建模、分集传输和接收技术、RAKE 解调器、频率选择信道中的 OFDM 传输和瑞利衰落信道中的数字传输的差错率性能。

第10章:信道容量和编码

本章讨论适合于通信信道的数学模型并介绍了一个基本的量化指标:信道容量,其给出了通过该信道可传输的信息量的极限。我们特别考察了两种信道模型:二元对称信道(BSC)和加性高斯白噪声(AWGN)信道,以上模型用于讨论在这些信道中为了获得可靠通信的分组码和卷积码。本章最后讨论了 turbo 码和低密度奇偶校验码(LDPC)的迭代译码。

第11章:多天线系统

本章讨论了多根发射和接收天线(多输入多输出,即 MIMO 系统)的使用,使用多天线可以利用空域来增加数据速率和提升无线通信系统性能。所讨论的议题包括用于多天线(MIMO)系统的信道模型,多天线(MIMO)系统的信号调制与解调,MIMO 信道的容量和用于 MIMO 系统的空时分组及格型码。

第12章:扩频通信系统

本章研究了扩频数字通信系统的基本要素,特别讨论了使用相移键控(PSK)的直接序列(DS)扩频和使用跳频(FH)的扩频系统,也讨论了在扩频系统中使用的伪噪声(PN)序列的产生。

第13章:数字调制方法的 Simulink 仿真指南

本章致力于介绍 Simulink 及其在数字调制系统中的应用。本章首先概述 Simulink,其中涵盖了系统仿真基础。后续几节提供了各种数字通信方案的许多仿真示例。第13章可通过本书的配套网站下载。

本书配套网站^①

通过本书的配套网站可免费下载第13章的 PDF 文件。该网站还包括了教材中使用的所有 MATLAB 和 Simulink 文件。这些文件分别放在对应不同章节的目录中。一些 MATLAB 文件可能在多个目录中出现,因为它在多章中用到。大部分文件加入许多注释,使其更易于理解。然而,在开发这些文件的过程中,主要目标是代码清晰而非执行效率。由于高效的代码可能难于理解,所以使用了效率较低但可读性更强的代码。将文件复制到个人计算机中并在 MATLAB 搜索路径中添加相应的路径,即可使用这些文件。所有文件已使用 MATLAB R2011a 进行了测试。

^① 登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)可注册下载本书相关资料。

采用本书作为教材的教师,可联系 Te_service@phei.com.cn 获取教学用相关资料。——编者注

打开 Cengage Learning Asia 网站(www.cengageasia.com),单击“Search Product”,输入本书英文版书号“9781111990176”并开始搜索。然后,点击本书英文书名链接,在打开的页面里即可看到 Student Companion Site 链接。点击这个链接后,读者可分别下载本书第 13 章 PDF 文件、全书 MATLAB 代码及其他资源。

致谢

Simulink 教程是慕尼黑通信工程学院开发的一个实验课程的修正和扩展版。我们感谢 Joachim Hagenauer 教授支持本书写作并给予该软件的使用权。我们还感谢做了大部分编程工作的 Christian Buchner 和 Christoph Renner。另外,我们要感谢 MathWorks 公司提供了未包含在标准学生版 MATLAB 中的 Simulink 模块许可权。我们特别要感谢 MathWorks 公司的 Stuart McGarrity, Mike McLernon 和 Alan Hwang 为我们提出有益的建议。我们同时感谢 Mehmet Aydinlik 和 Osso Vahabzadeh 在开发本书解说题的 MATLAB 代码方面的帮助。

我们感谢本书第三版的评阅人,加州大学北岭分校的 Nagwa Bekir,亚利桑那州立大学的 Tolga Duman,卫奇塔州立大学的 Hyuck M. Kwon 和弗吉尼亚理工大学的 Ting-Chung Poon 所提供的有益评论。

John G. Proakis

Masoud Salehi

Gerhard Bauch

目 录

第 1 章 信号与线性系统	1
1.1 概述	1
1.2 傅里叶级数	1
1.3 傅里叶变换	13
1.4 功率和能量	23
1.5 带通信号的低通等效	26
1.6 习题	30
第 2 章 随机过程	33
2.1 概述	33
2.2 随机变量的产生	33
2.3 高斯和高斯-马尔可夫过程	38
2.4 随机过程的功率谱和白色过程	42
2.5 随机过程的线性滤波	47
2.6 低通和带通过程	51
2.7 数字通信系统的 Monte Carlo 仿真	55
2.8 习题	58
第 3 章 模拟调制	61
3.1 概述	61
3.2 幅度调制	61
3.3 AM 信号的解调	78
3.4 角调制	90
3.5 习题	97
第 4 章 模数转换	99
4.1 概述	99
4.2 信息的度量	99
4.3 量化	104
4.4 习题	134

第 5 章 基带数字传输	137
5.1 概述	137
5.2 二进制信号传输	137
5.3 多幅度信号传输	163
5.4 多维信号	171
5.5 习题	186
第 6 章 带限信道的数字传输	189
6.1 概述	189
6.2 数字 PAM 信号的功率谱	189
6.3 带限信道特性和信道失真	192
6.4 码间干扰的特性	202
6.5 带限信道的通信系统设计	206
6.6 线性均衡器	217
6.7 非线性均衡器	229
6.8 习题	234
第 7 章 载波调制的数字传输	238
7.1 概述	238
7.2 载波幅度调制	238
7.3 载波相位调制	243
7.4 正交幅度调制	259
7.5 载波频率调制	266
7.6 通信系统中的同步	275
7.7 习题	283
第 8 章 多载波调制和 OFDM	286
8.1 概述	286
8.2 OFDM 信号的产生	287
8.3 OFDM 信号的解调	289
8.4 利用循环前缀来消除信道的色散	292
8.5 OFDM 信号的频谱特性	294
8.6 OFDM 系统中的峰均功率比	295
习题	299
第 9 章 无线信道中的数字传输	300
9.1 概述	300
9.2 时变多径信道的信道模型	300

9.3	瑞利衰落信道中二元调制系统的性能	309
9.4	习题	322
第 10 章	信道容量和编码	323
10.1	概述	323
10.2	信道模型和信道容量	323
10.3	信道编码	332
10.4	turbo 编码与迭代译码	356
10.5	低密度奇偶校验码	373
10.6	习题	379
第 11 章	多天线系统	381
11.1	概述	381
11.2	多天线系统的信道模型	381
11.3	慢衰落频率非选择性 MIMO 信道中的信号传输	382
11.4	MIMO 信道的容量	389
11.5	MIMO 系统的空时编码	396
11.6	习题	404
第 12 章	扩频通信系统	406
12.1	概述	406
12.2	直接序列扩频系统	406
12.3	PN 序列的产生	414
12.4	跳频扩频	420
12.5	习题	429
第 13 章	数字调制方法的 Simulink 仿真指南(见配套网站)	
参考文献	430

第1章 信号与线性系统

1.1 概述

本章回顾了通信系统分析中用到的一些线性系统分析的基本方法和技术。在通信系统研究中,有两个基本问题是一定要搞清楚的,其中一个问题是线性系统及其在时域和频域的特性,另一个问题是随机信号的概率与分析。大多数通信信道以及发射和接收装置中的很多部分,都可以用线性时不变(LTI)系统来建模,所以来自线性系统分析中的一些著名方法和技术都能在通信系统分析中使用。我们的讨论重点放在频域分析方法上,因为在通信系统分析中这是最常用的技术。本章的讨论从傅里叶级数和傅里叶变换开始,然后再包括功率和能量的概念、采样定理以及带通信号的低通表示等。

1.2 傅里叶级数

线性时不变系统的输入/输出关系由如下的卷积积分所定义:

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t-\tau) d\tau \quad (1.2.1)$$

其中, $h(t)$ 记为系统的冲激响应, $x(t)$ 为输入信号, $y(t)$ 则为输出信号。如果 $x(t)$ 是一个由

$$x(t) = Ae^{j2\pi f_0 t} \quad (1.2.2)$$

给出的复指数信号,那么输出为

$$\begin{aligned} y(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} Ae^{j2\pi f_0(t-\tau)} h(\tau) d\tau \\ &= A \left[\int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) e^{-j2\pi f_0 \tau} d\tau \right] e^{j2\pi f_0 t} \end{aligned} \quad (1.2.3)$$

换句话说,该输出是一个与输入信号具有相同频率的复指数。但是,输出的(复)振幅是输入(复)振幅乘以

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) e^{-j2\pi f_0 \tau} d\tau$$

应该注意到,上式这个量是该LTI系统冲激响应 $h(t)$ 以及输入信号频率 f_0 的函数。因此,计算LTI系统对指数输入的响应特别容易。这样,在线性系统分析中应该寻找一些将信号展开成复指数之和的方法。傅里叶级数和傅里叶变换就是利用复指数来展开信号的技术。

当采用信号集合 $\{e^{j2\pi n t/T_0}\}_{n=-\infty}^{\infty}$ 作为展开式的基时,傅里叶级数就是周期为 T_0 的周期信号的正交展开。利用这个基,任何周期为 T_0 的周期信号 $x(t)$ ^①都可以表示为

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n e^{j2\pi n t/T_0} \quad (1.2.4)$$

其中, x_n 称为信号 $x(t)$ 的傅里叶级数系数,并由下式给出:

^① 傅里叶级数存在的充分条件就是 $x(t)$ 满足狄利赫利(Dirichlet)条件。详见参考文献 Alamouti(1998)。

$$x_n = \frac{1}{T_0} \int_{\alpha}^{\alpha+T_0} x(t) e^{-j2\pi nt/T_0} dt \quad (1.2.5)$$

其中, α 是任意常数, 其大小按使得该积分式计算简便来选取。频率 $f_0 = 1/T_0$ 称为该周期信号的基波频率, 而 $f_n = nf_0$ 称为第 n 次谐波。在大多数情况下, $\alpha = 0$ 或 $\alpha = -T_0/2$ 都是一种好的方案。

这种形式的傅里叶级数称为指数形式的傅里叶级数, 它既能用于实值, 也能用于复值信号 $x(t)$, 只要它们是周期信号即可。一般来说, 傅里叶级数的系数 $\{x_n\}$ 是复数, 即使当 $x(t)$ 是一个实值信号时也是如此。

当 $x(t)$ 是一个实值周期信号时, 有

$$\begin{aligned} x_{-n} &= \frac{1}{T_0} \int_{\alpha}^{\alpha+T_0} x(t) e^{j2\pi nt/T_0} dt \\ &= \frac{1}{T_0} \left[\int_{\alpha}^{\alpha+T_0} x(t) e^{-j2\pi nt/T_0} dt \right]^* \\ &= x_n^* \end{aligned} \quad (1.2.6)$$

由此显然有

$$\begin{cases} |x_n| = |x_{-n}| \\ \angle x_n = -\angle x_{-n} \end{cases} \quad (1.2.7)$$

因此, 实值信号的傅里叶级数系数具有厄尔米特对称性, 即它们的幅值是偶函数, 相位是奇函数(或者说, 它们的实部是偶函数, 虚部是奇函数)。

傅里叶级数的另一种形式称为三角函数形式的傅里叶级数, 它仅适用于实值周期信号。定义

$$x_n = \frac{a_n - jb_n}{2} \quad (1.2.8)$$

$$x_{-n} = \frac{a_n + jb_n}{2} \quad (1.2.9)$$

再利用欧拉公式

$$e^{-j2\pi nt/T_0} = \cos\left(2\pi t \frac{n}{T_0}\right) - j\sin\left(2\pi t \frac{n}{T_0}\right) \quad (1.2.10)$$

可以得到

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T_0} \int_{\alpha}^{\alpha+T_0} x(t) \cos\left(2\pi t \frac{n}{T_0}\right) dt \\ b_n &= \frac{2}{T_0} \int_{\alpha}^{\alpha+T_0} x(t) \sin\left(2\pi t \frac{n}{T_0}\right) dt \end{aligned} \quad (1.2.11)$$

因此,

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(2\pi t \frac{n}{T_0}\right) + b_n \sin\left(2\pi t \frac{n}{T_0}\right) \quad (1.2.12)$$

注意, 对于 $n=0$, 总有 $b_0=0$, 所以 $a_0=2x_0$ 。

再定义

$$\begin{cases} c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\ \theta_n = -\arctan \frac{b_n}{a_n} \end{cases} \quad (1.2.13)$$

并利用下列关系:

$$a \cos \phi + b \sin \phi = \sqrt{a^2 + b^2} \cos\left(\phi - \arctan \frac{b}{a}\right) \quad (1.2.14)$$

就可以将式(1.2.12)写成

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos\left(2\pi t \frac{n}{T_0} + \theta_n\right) \quad (1.2.15)$$

这就是对实值周期信号进行傅里叶级数展开的第三种形式。实值周期信号的傅里叶级数 $\{x_n\}$ 与 a_n, b_n, c_n 和 θ_n 的关系一般是通过

$$\begin{cases} a_n = 2\operatorname{Re}[x_n] \\ b_n = -2\operatorname{Im}[x_n] \\ c_n = 2|x_n| \\ \theta_n = \angle x_n \end{cases} \quad (1.2.16)$$

联系起来的。将 $|x_n|$ 和 $\angle x_n$ 对 n 或 nf_0 作图,该图称为 $x(t)$ 的离散频谱。 $|x_n|$ 的图通常称为幅度谱,而 $\angle x_n$ 的图则称为相位谱。

如果 $x(t)$ 是实值且为偶函数,即 $x(-t) = x(t)$,那么取 $\alpha = -T_0/2$,则有

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) \sin\left(2\pi t \frac{n}{T_0}\right) dt \quad (1.2.17)$$

因为被积函数是 t 的奇函数,所以该积分的值为零。因此,对于实值的偶信号 $x(t)$ 来说,所有 x_n 都是实数。这时三角函数型的傅里叶级数全部由余弦函数构成。同理,若 $x(t)$ 是实值的奇函数,即 $x(-t) = -x(t)$,则有

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{\alpha}^{\alpha+T_0} x(t) \cos\left(2\pi t \frac{n}{T_0}\right) dt \quad (1.2.18)$$

为零,并且所有 x_n 均为虚数,这时三角函数型傅里叶级数全部由正弦函数构成。

解答题

解答题 1.1 [矩形信号串的傅里叶级数]

令周期为 T_0 的周期信号 $x(t)$ 定义为

$$x(t) = A\Pi\left(\frac{t}{2t_0}\right) = \begin{cases} A, & |t| < t_0 \\ \frac{A}{2}, & t = \pm t_0 \\ 0, & \text{其余 } t \end{cases} \quad (1.2.19)$$

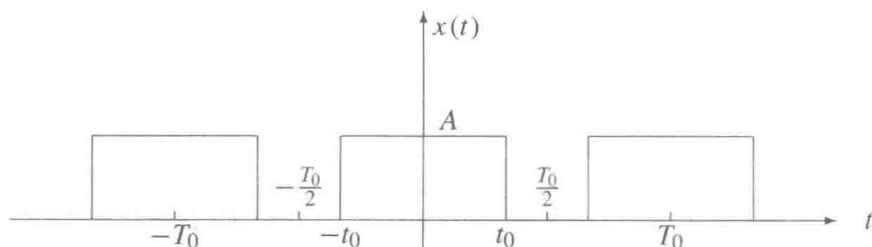
其中,当 $|t| \leq T_0/2$ 时, $t_0 < T_0/2$ 。短形信号 $\Pi(t)$ 按惯例定义为

$$\Pi(t) = \begin{cases} 1, & |t| < \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2}, & t = \pm \frac{1}{2} \\ 0, & \text{其余 } t \end{cases} \quad (1.2.20)$$

图 1.1 所示的就是 $x(t)$ 。

假定 $A=1, T_0=4$ 和 $t_0=1$,

1. 求分别用指数和三角函数展开的 $x(t)$ 的傅里叶级数系数。
2. 画出 $x(t)$ 的离散谱。

图 1.1 解答题 1.1 中的信号 $x(t)$

题 解

1. 导出 $x(t)$ 展开式的傅里叶级数系数, 有

$$\begin{aligned} x_n &= \frac{1}{4} \int_{-1}^1 e^{-j2\pi nt/4} dt \\ &= \frac{1}{-2j\pi n} [e^{-j2\pi n/4} - e^{j2\pi n/4}] \end{aligned} \quad (1.2.21)$$

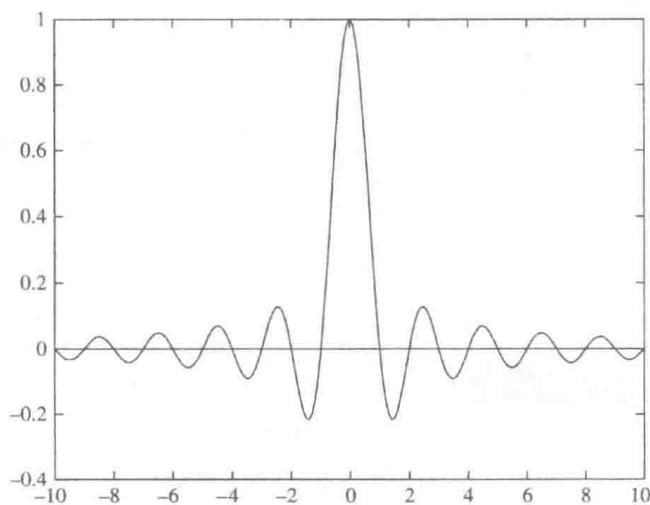
$$= \frac{1}{2} \operatorname{sinc}\left(\frac{n}{2}\right) \quad (1.2.22)$$

其中, $\operatorname{sinc}(x)$ 定义为

$$\operatorname{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} \quad (1.2.23)$$

图 1.2 给出了 sinc 函数。显然, 所有 x_n 都是实数, 因为 $x(t)$ 是实值的偶函数, 所以

$$\begin{cases} a_n = \operatorname{sinc}\left(\frac{n}{2}\right) \\ b_n = 0 \\ c_n = \left| \operatorname{sinc}\left(\frac{n}{2}\right) \right| \\ \theta_n = 0, \pi \end{cases} \quad (1.2.24)$$

图 1.2 sinc 信号

注意, 当 n 为偶数时, $x_n = 0$ ($n=0$ 例

外, 这时 $a_0 = c_0 = 1$, 并且 $x_0 = \frac{1}{2}$)。利用这些系数, 我们得到

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} \operatorname{sinc}\left(\frac{n}{2}\right) e^{j2\pi nt/4} \\ &= \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \operatorname{sinc}\left(\frac{n}{2}\right) \cos\left(2\pi t \frac{n}{4}\right) \end{aligned} \quad (1.2.25)$$

图 1.3 给出的是 $n=0, 1, 3, 5, 7$ 和 9 时傅里叶级数在一个周期内对该信号的近似。可以注意到, 随着 n 的增加, 近似信号变得越来越逼近原始信号 $x(t)$ 。

2. 注意, x_n 总是实数。因此, 取决于它的符号, 其相位不是 0 就是 π 。 x_n 的幅度是 $\frac{1}{2} \left| \operatorname{sinc}\left(\frac{n}{2}\right) \right|$, 其离散谱如图 1.4 所示。

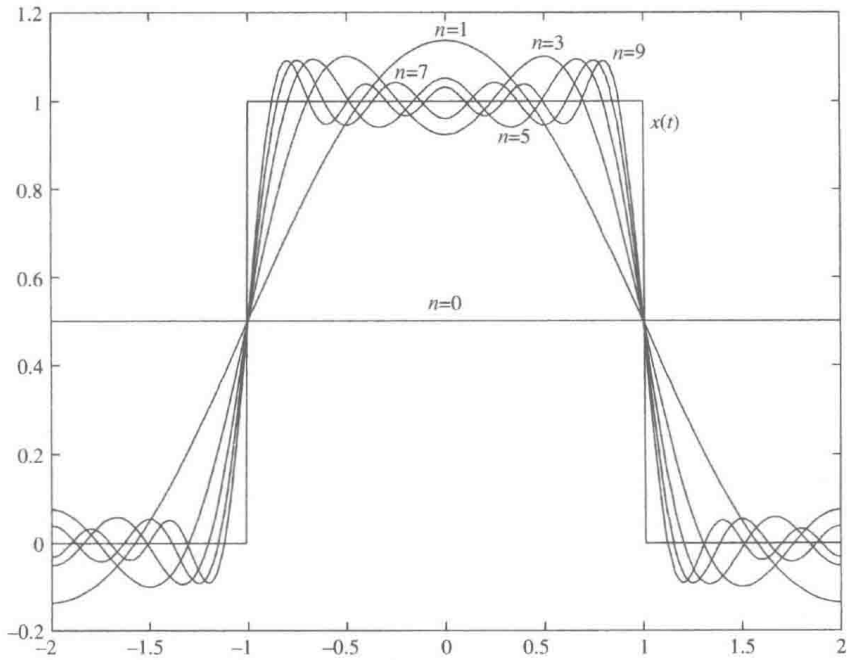


图 1.3 在解答题 1.1 中,对矩形脉冲的各种傅里叶级数的近似

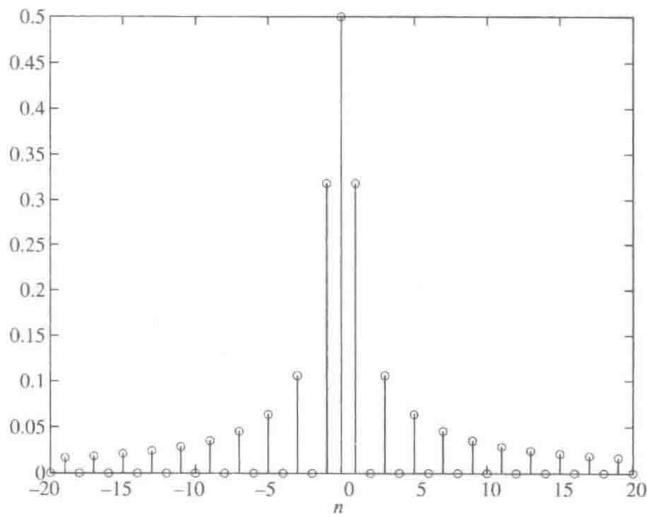


图 1.4 解答题 1.1 中的信号的离散谱

下面是画出信号离散谱的 MATLAB 脚本。

m 文件

```
% MATLAB script for Illustrative Problem 1.1.
n=[-20:1:20];
x_actual=abs(sinc(n/2));
figure
stem(n,x_actual);
```

信号 $x(t)$ 在 a 和 b 之间的一个周期如图 1.5 所示,并且 $[a, b]$ 区间内的信号由一个 m 文件给出,其傅里叶级数的系数可用下面的 m 文件 fseries.m 求得。

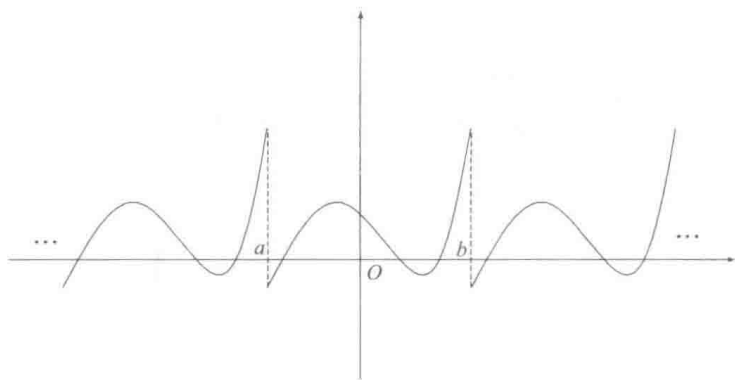


图 1.5 一种周期信号

m 文件

```
function xx=fseries(funfcn,a,b,n,tol,p1,p2,p3)
%FSERIES Returns the Fourier series coefficients.
% XX=FSERIES(FUNFCN,A,B,N,TOL,P1,P2,P3)
% funfcn=the given function, in an m-file.
% It can depend on up to three parameters
% p1,p2, and p3. The function is given
% over one period extending from 'a' to 'b'
% xx=vector of length n+1 of Fourier Series
% Coefficients, xx0,xx1,...,xxn.
% p1,p2,p3=parameters of funfcn.
% tol=the error level.

j=sqrt(-1);
args0=[];
for nn=1:nargin-5
    args0=[args0,'p',int2str(nn)];
end
args=[args0,')'];
t=b-a;
xx(1)=eval(['1/(',num2str(t),')'*quad(funfcn,a,b,tol,[ ],args)

for i=1:n
    new_fun = 'exp_funct';
    args=[' ', num2str(i), ', ', num2str(t), args0, ')'];
    xx(i+1)=eval(['1/(',num2str(t),')'*quad(new_fun,a,b,tol,[ ],funfcn',args)];
end
```

解说题

解说题 1.2 [幅度谱和相位谱]

求解并画出周期为 8 且 $|t| \leq 4$ 时 $x(t) = \Lambda(t)$ 的周期信号的离散幅度谱和相位谱。

解 题

因为信号已由 m 文件 lambda.m 给出,可以通过选定区间 $[a, b] = [-4, 4]$ 来求出各系数。应该注意,由 m 文件 fseries.m 求得的傅里叶级数的系数对应于非负的 n 值,但由于现在 $x(t)$ 是实值的,从而有 $x_{-n} = x_n^*$ 。图 1.6 给出了 $n = 24$ 时该信号的幅度谱和相位谱。

求解并画出幅度谱和相位谱的 MATLAB 脚本如下所示。

m 文件

```
% MATLAB script for Illustrative Problem 1.2.
echo on
fncf='lambda';
a=-4;
b=4;
n=24;
tol=1e-6;
xx=fseries(fncf,a,b,n,tol);
xx1=xx(n+1:-1:2);
xx1=[conj(xx1),xx];
absxx1=abs(xx1);
pause % Press any key to see a plot of the magnitude spectrum.
n1=[-n:n];
stem(n1,absxx1)
title('The Discrete Magnitude Spectrum')
phasesx1=angle(xx1);
pause % Press any key to see a plot of the phase.
stem(n1,phasesx1)
title('The Discrete Phase Spectrum')
```

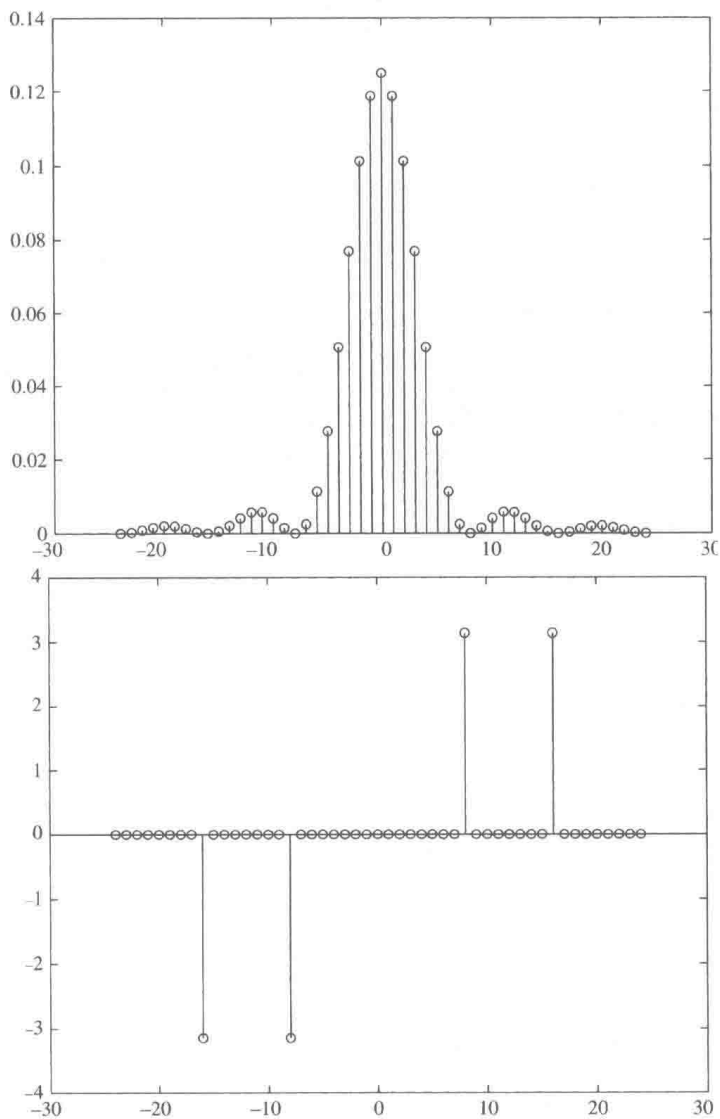


图 1.6 解说题 1.2 中信号的幅度谱和相位谱