

信号与系统

Signals and Systems

(美) Michael J. Roberts 著
胡剑凌 等译

INTERNATIONAL EDITION

M. J. Roberts

Signals and Systems

Analysis Using
Transform Methods
and MATLAB®

电子与电气工程丛书

本书是作者多年从事信号与系统课程的教学和科研工作的经验总结，力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。本书可作为高等院校电子信息类、电气工程及其自动化专业及相关专业的教材，也可供从事信号与系统工作的工程技术人员参考。

信号与系统

Signals and Systems

(美) Michael J. Roberts 著

胡剑凌 等译



机械工业出版社
China Machine Press

本书讲述信号与系统分析的基础理论,主要包括连续时间和离散时间函数、傅里叶级数、傅里叶变换、傅里叶变换分析、采样和离散傅里叶变换、两个信号之间的相关性/信号能量/功率谱密度、拉普拉斯变换、拉普拉斯变换分析、离散时间系统的 z 变换、 z 变换分析等,同时介绍如何用离散时间系统来近似连续时间系统以及数字滤波器设计方法。本书实例丰富,讲解透彻,并介绍实现分析方法的 MATLAB 函数和运算。

本书适合作为电子工程专业、控制专业及其他相关专业的教材或参考书。

Michael J. Roberts: *Signals and Systems: Analysis Using Transform Methods and MATLAB*
(ISBN 007-123268-0).

Copyright © 2004 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original English edition published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and China Machine Press.

本书中文简体字翻译版由机械工业出版社和美国麦格劳-希尔教育(亚洲)出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

本书版权登记号:图字:01-2003-8118

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统/(美)罗伯兹(Roberts, M. J.)著;胡剑凌等译. - 北京:机械工业出版社,2006.1
(电子与电气工程丛书)

书名原文:Signals and Systems: Analysis Using Transform Methods and MATLAB

ISBN 7-111-17110-1

I. 信… II. ①罗…②胡… III. 信号系统-高等学校-教材 IV. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 090641 号

机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:傅志红 李 涛

北京牛山世兴印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2006 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·37.25 印张

印数:0 001-4 000 册

定价:65.00 元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010) 68326294

译者序

信号与系统课程是电子类、自控类及计算机类专业非常重要的专业基础课。在这门课程中,学生会首次接触变换理论,但由于变换理论的抽象性容易造成学生对概念理解的困惑,从而忽略了分析系统对信号响应的真正目的。本书的写作将易懂性和数学严格性完美地结合起来,内容介绍循序渐进,概念介绍直观形象,同时配以大量的图形解释、例题和习题,并给出了 MATLAB 实现的例子,极大地方便了教与学。本书的出版正是广大从事该方面教学的同仁们的一大福音,同时对我国各高校正在从事的面向 21 世纪课程体系和内容改革会起到一定的借鉴作用。

本书采用从基本概念出发、以实际应用为例子的介绍方法,遵循从模拟到离散、从信号到系统的分析思路,系统地介绍了连续时间和离散时间信号与系统的分析方法。第 1 章给出了信号与系统的定义。第 2 章和第 3 章给出了信号与系统的数学描述及基本概念。第 4 章到第 6 章介绍了傅里叶分析方法,包括连续时间/离散时间傅里叶级数、连续时间/离散时间傅里叶变换以及傅里叶分析方法在滤波器和通信系统中的应用。第 7 章和第 8 章以傅里叶分析为基础介绍了采样和离散傅里叶变换,分析了两个信号之间的相关性、信号的能量以及功率谱密度。第 9 章和第 10 章介绍了连续时间系统的拉普拉斯变换以及拉普拉斯变换在电路分析、反馈系统和多输入多输出系统中的应用。第 11 章和第 12 章介绍了离散时间系统的 z 变换以及如何用离散时间系统来近似连续时间系统、数字滤波器设计方法。最后的附录部分^①包括:一些有用的数学关系、MATLAB 介绍、寻找最小公倍数方法、卷积性质、傅里叶变换对表、拉普拉斯变换对表、 z 变换对表、复数和复变函数、微分和差分方程以及矢量和矩阵。

全书在介绍基本概念的同时给出了大量的实际应用例子,并介绍了实现这些方法的 MATLAB 函数和运算。这些例题一方面紧密结合了基本概念与方法的应用,另一方面也减缓了对某些抽象概念理解上的梯度。同时全文给出了大量的习题,共 501 道(正文),这些习题根据难易程度分成了两类,第一类是作为训练使用的较简单的习题,并给出了习题的答案,第二类用来进一步加深读者对概念的理解,难度也较大,且没有提供答案。引入大量难易程度不同的例题和习题是本书的重要特点,使得本书非常适合于教与学。

翻译是一种很苦的工作,本书历时近 8 个月才完成了初稿。在对初稿的校对中,我们一起讨论分析,使得大家对信号与系统的理论又有了一层更深的认识。对所有参加翻译的人而言,这次翻译不仅仅是一种“必须完成的任务”,而且是一种锻炼,一种知识和文学素养的锻炼。但当书籍即将出版的时候,这种苦已经变成了一种期待的兴奋和快乐。作为一名老师和译者,我真诚希望与读者分享这种快乐。参加翻译的人员有:包晓刚、陈善荣、徐向敏、肖建荣、郑洪超、朱敏、李彬、刘伟节、蒋伟、许成亮。此时我要感谢我的导师——陈健教授将我领进了教育这个神圣的殿堂。感谢生我养我的父母,是你们的谆谆教诲让我成长。最后我要感谢我的妻子,你的无私奉献和默默的支持是我前进的动力;也要感谢我可爱的女儿,在我疲惫和苦恼的时候带给我无比的快乐。

在本书的翻译过程中改正了原著中的一些错误,大部分属于录入和排版时的疏漏。同时限于水平和时间原因,书中难免有误漏之处,敬请读者批评指正。

胡剑凌

2005 年 7 月

译者简介

胡剑凌,2000 年获上海交通大学电子工程系通信与信息系统专业博士学位,同年留校任教,现任该系副教授。从事数字信号处理的教学和科研工作,曾负责“语音信号处理”、“数字信号处理系统的设计与实践”、“先进数字信号处理技术与应用”、“自适应信号处理”等多门课程的教学。主要从事多媒体信号处理和数字信号处理系统的设计与实现等方面的研究工作,已经发表 30 多篇论文,并参与编撰了上海市研究生教学用书《数字信号处理系统的设计与应用》和《数字信号处理器开发实践》。

① 本书附录部分在华章网站 www.hzbook.com 下载。——编辑注

前 言

动机

我写这本书是因为我热爱信号与系统分析中的数学完美性。在科学和工程的许多领域中,最重要而且最有用的理论学说,都应像牛顿定律、麦克斯韦方程和爱因斯坦相对论一样,能把握物理现象的本质。我不知道写作本书究竟花了多长时间,但至少有几千小时,如果不是对它充满热情的话,我认为任何人都是很难(或者是不可能)完成这项工作的。

读者对象

我给大学三年级信号与系统课程写了许多年的教学讲义,在 2000 年,我觉得这些讲义已经相当成熟,因此决定将它们整理成书出版。本书来自于教学讲义,它的内容涵盖了信号与系统分析基础理论两个学期的课程。本书的内容不仅适用于工科大学三年级,也可用于大学四年级相应学科的教学,以及作为一学期的研究生教材。我将它用于研究生对线性变换方法的回顾教程。

概述

本书首先介绍描述连续时间和离散时间信号与系统的数学方法,然后介绍傅里叶级数的变换思想,并以此为基础介绍傅里叶变换。傅里叶变换是傅里叶级数对非周期信号的一种扩展。随后的一章给出傅里叶分析的应用,包括滤波器和通信系统。在介绍傅里叶方法之后,用它们解释了采样的含义,分析了两个信号之间的相关性、信号的能量以及功率谱密度。接下来介绍拉普拉斯变换及其在电路分析、反馈系统和多输入多输出系统中的应用。拉普拉斯变换既是连续时间傅里叶变换用于无界信号和非稳定系统的一般化,也是系统分析的一种强有力工具,因为它与连续时间线性系统的特征值和特征函数有着密切的联系。本书用相同的方式介绍离散时间系统的 z 变换。在第 12 章花了大量篇幅介绍如何用离散时间系统来近似连续时间系统以及数字滤波器设计方法。全书给出了大量的例子,并介绍实现上述方法的 MATLAB 函数和运算。

各章概要

第 1 章介绍在信号与系统分析中涉及的一般性概念,不包括任何严格的数学推导。目的是通过揭示信号与系统在日常生活中的普遍性以及理解它们的重要性来激发学生的学习兴趣。

第 2 章介绍描述各种信号的数学方法。从熟悉的函数,如连续时间(CT)谐波函数和指数函数出发,然后扩展信号描述函数的范围以涵盖 CT 奇异函数(开关函数),以及通过卷积和/或傅里叶变换而与之相关的其他函数。像大多数信号与系统教科书一样,本书定义了单位阶跃函数、符号函数、单位冲激响应函数、单位斜坡函数和单位采样(sinc)函数。另外定义了单位矩形函数、单位三角函数和单位梳状函数(单位冲激的周期序列),由于利用这些函数能简洁地表示其他信号,因而它们非常方便和有用。单位梳状函数联合卷积运算能给任意周期信号提供一种特别简洁的数学描述方式。

在介绍这些新的 CT 信号函数后,本书阐述了普通类型的信号变换(幅度缩放、时移、时间缩放、微分、积分),并将它们应用于信号函数。随后介绍一些在某些变换中保持不变的信号属性(奇偶性、周期性等),以及这些信号属性在信号分析中的含义。

第 2 章还采用与 CT 信号相类似的方式介绍离散时间(DT)信号。主要包括 DT 谐波函数和指数函数,讨论 DT 谐波函数的周期检测问题。这是学生第一次接触采样的一些概念。书中定义了一些类似于 CT 奇异函数的 DT 信号函数。然后介绍了 DT 信号函数的幅度缩放、时移、时间缩放、差分变换和累加,并指出 DT 函数中,尤其是时间缩放中出现的一些独特含义和问题。

第 2 章最后一节介绍信号的能量和功率。书中同时给出 CT 信号和 DT 信号的能量和功率定义,并通过

能量信号和功率信号的定义与讨论指出两者的必要性。

第3章介绍系统的数学描述。首先给出最通用的系统分类形式(齐次性、可加性、线性、时不变性、因果性、记忆性、静态非线性、可逆性)。书中通过例子给出具有或不具有这些性质的不同类型的系统,以及如何通过系统的数学描述来证明系统所具有的不同性质。

第3章接下来主要的一节介绍线性时不变DT系统响应分析的两种重要方法:脉冲响应和卷积。书中给出卷积的数学形式并用图解方式说明卷积和公式的意义。书中同时介绍如何利用卷积性质将多个串联或并联的子系统合并成一个系统,以及整个系统的脉冲响应应该是什么。其后一节介绍CT卷积。与CT系统的脉冲响应相比,学生更易于理解如何计算DT系统的脉冲响应,因此这样的章节顺序安排是合理的。同样,由于DT卷积不涉及极限的概念,因而DT卷积也更易于理解。第3章的最后一节介绍了系统方框图与系统方程之间的关系。

第4章介绍傅里叶级数,学生开始接触变换方法。该章首先用图形的方式介绍一个概念,即任何工程应用的CT信号在有限长的时间段内都可以用CT谐波信号(实数形式的或复数形式的)的线性组合来表示。该章随后阐述周期信号在整个时间段内都可以用谐波信号的线性组合来表示。然后用正交概念正式推导傅里叶级数,从而揭示为何信号可以描述成离散谐波函数。书中同时提到了狄利克雷条件,以便让学生知道CT傅里叶级数可以应用于所有实际的CT信号,但不能应用于所有可想像的CT信号。

随后一节从单个谐波信号开始,进而扩展到多谐波信号和非谐波信号,并伴随有众多的插图解释,介绍求解一个时间函数的谐波分量的数学过程。利用这种方式可以自然地引出正交概念和相关概念,并作了简单讨论。

第4章接下来的几节揭示了傅里叶级数的性质。在介绍中尽可能使傅里叶级数的符号和性质与随后将要介绍的傅里叶变换保持类似。也就是组成傅里叶级数的谐波函数与时间函数成对出现。按照大多数信号与系统教科书中所采用的惯例,本书在所有的变换中用小写字母表示时域量,用大写字母表示它们的变换量(在傅里叶级数中是谐波函数)。这样有助于理解傅里叶方法之间的相互关系。同许多关于信号与系统、控制系统、数字信号处理、通信系统和傅里叶方法的其他应用,如图像处理和傅里叶光学的书一样,本书也采用了两种不同的符号习惯,即周期频率 f 和角频率 ω 。书中强调了这两个变量通过变量替换而简单地相关。这样写作的目的是为学生在大学和职业生涯中阅读其他书时碰到这两种形式做好准备。本章同时强调傅里叶级数的其他方面,尤其是关于使用不同周期表示的问题,这是在第7章的采样和离散傅里叶变换中将会出现的一个重要概念。本书鼓励学生使用表格和性质来求解谐波函数,这种方法为求解傅里叶变换以及随后的拉普拉斯变换和 z 变换做好了准备。本章的另外一节是关于傅里叶级数的收敛性,阐述了在信号非连续点的吉布斯现象。

第4章的随后一节介绍了与第1节相似的基本概念,但是是针对DT信号,强调了由于连续和离散时间信号之间的不同而引起的重要区别,特别是与CT傅里叶级数(一般)无限和范围相对应的DT傅里叶级数有限和范围。同时指出一个重要的事实,即DT傅里叶级数将一个有限的数据集合与另一个有限的数据集合联系起来,从而使得它可以直接用数字计算机计算。而DT傅里叶级数和离散傅里叶变换(DFT)之间的强相似性将在第7章的结尾部分阐述。

第5章将傅里叶级数的概念扩展到非周期信号进而引入傅里叶变换。书中通过分析当信号的周期接近无限大时傅里叶级数的特性定义,导出CT傅里叶级数的一般化形式——CT傅里叶变换。随后书中推导了所有CT傅里叶变换的重要性质。在之后的一节中以相似的方法介绍和推导了DT傅里叶变换。书中给出了大量CT和DT傅里叶变换性质的例子。

第5章的最后一节比较了4种傅里叶方法。这一节是非常重要的,因为它重新强调了许多概念,包括:1)连续时间和离散时间;2)时间采样和频率采样(这是第7章——采样和离散傅里叶变换中的重要概念)。书中尤其强调了一个域中采样和另一个域中周期重复性之间的对偶性,以及采样信号和脉冲采样信号之间的信息一致性。

第6章介绍傅里叶方法在两类系统分析中的应用:滤波和通信系统。在这两类系统分析中傅里叶方法非常适用。书中定义了一个理想滤波器,并回到因果性的概念指出理想滤波器在一个物理系统中是无法实现的。这是一个在频域中无法达到而在时域中可以近似逼近的设计实例。书中随后讨论和分析了一些简单实际的无源滤波器和有源滤波器,并证明了它们是因果系统。为了快速分析串联系统引入了波特图。随后该章

介绍了最简单的调制形式并显示如何用傅里叶分析来大大地简化对它们的理解。该章同时用一个调制信号阐述相位和群时延的概念。在随后一节用类似的方式将同样的调制原理应用于 DT 信号和系统。最后一节简单介绍利用滤波器降低通信系统噪声的应用以及谱分析仪的操作。

第 7 章首先介绍 CT 信号和对其采样而形成的 DT 信号之间的对应关系。第 1 节的内容涵盖了在实际系统中采样是如何应用在采样保持和模数转换器中的。第 2 节的内容从一个问题开始,即需要使用多少采样值才能充分描述 CT 信号。这个问题通过香农(Shannon)采样定理的推导给出解答。首先用 DT 傅里叶变换来描述一个通过采样 CT 信号而得到的 DT 信号,然后通过信号的脉冲采样证明采样后的信号与脉冲采样信号之间的对应性,并用 CT 傅里叶变换得出同样的结果。接着该章讨论理论和实际的插值方法,带限周期信号的特殊性质,以及与 DT 傅里叶级数相关的离散傅里叶变换(DFT)。并给出 DFT 的整个推导过程,从一个 CT 信号出发,通过时域采样、加窗和频域采样,得到两个由有限个数字集合完全表示的信号,而这两个信号通过 DFT 一一对应。随后该章给出如何用 DFT 来近似一个能量信号或周期信号的 CT 傅里叶变换。接下来的一节给出了一系列例子以说明 DFT 的应用和性质。最后一节讨论快速傅里叶变换(FFT),并说明为何 FFT 是计算 DFT 的一个非常有效的算法。

第 8 章内容涉及相关性、能量谱密度和功率谱密度。这些内容往往不在信号与系统的教材中介绍,而是在随机过程的课程中讲授。本书从分析两个信号的相似性出发来介绍这些概念。相关性是系统识别和匹配滤波中的一个重要概念。书中解释了随机信号和确定信号的相关性和自相关性,但在习题中只要求学生分析确定信号的相关性和自相关性。由于能量谱密度和功率谱密度分别是能量信号和功率信号自相关函数的傅里叶变换,因而书中也包括了这些概念的介绍。

第 9 章介绍拉普拉斯变换。本书从两个角度推导拉普拉斯变换,一个是从傅里叶变换应用于更广义信号时的一般化出发;另一个是通过分析复指数信号激励线性时不变系统所产生的结果导出。书中首先定义了双边拉普拉斯变换,并讨论收敛域的重要性。然后定义了单边拉普拉斯变换,并将它应用于本章随后的大部分小节直到最后再次返回到双边拉普拉斯变换。书中推导了拉普拉斯变换的所有重要性质,并详细介绍了计算逆变换的部分分式展开法。随后给出在给定初始条件下求解微分方程的例子。最后该章又回到双边拉普拉斯变换形式,并指出双边变换可以通过查找单边变换表得到。

第 10 章的内容涵盖拉普拉斯变换的各种应用,包括复频域中系统的方框图表示、系统稳定性、系统互连性、反馈系统(包括根轨迹分析法、增益裕量和相位裕量)、方框图简化、系统对标准信号的响应、频率响应、巴特沃兹(Butterworth)滤波器,以及 CT 系统的标准实现和状态空间法。

第 11 章介绍 z 变换。除了 z 变换在 DT 信号和系统中的应用外,其他的介绍过程与拉普拉斯相似。书中首先定义双边变换,讨论收敛域,然后定义单边变换。书中同样推导了 z 变换的所有重要性质,介绍计算逆变换的部分分式展开法,以及给定初始条件的差分方程的求解。随后该章又回到双边变换并指出双边变换可以通过查找单边变换表得到。该章也分析了拉普拉斯变换和 z 变换之间的关系,这是在第 12 章中将要介绍的用 DT 系统来近似 CT 系统中的一个重要思想。

第 12 章介绍 z 变换的应用。主要内容是用 DT 系统近似 CT 系统,尤其是作为最优模拟滤波器近似的数字滤波器设计、标准信号的响应、系统互连性、标准系统实现和状态空间法。

附录部分有的仅有一页(如,介绍如何寻找最小公倍数的附录),有的包含许多页(如,介绍 MATLAB 主要命令和操作的附录)。附录 E、F 和 G 分别是傅里叶方法、拉普拉斯变换和 z 变换的变换表。附录 H、I 和 J 分别介绍复数和复变量、微分和差分方程、矢量和矩阵,这些内容通常被认为是信号与系统课程的背景知识。这些附录与书中章节一样,在每个附录后带有习题。如果学生在某个课程中需要的话,这些附录也可以用作对知识的回顾。附录部分请在华章网站 www.hzbook.com 下载。

连续性

本书的内容是循序渐进的,每一章的内容都是建立在前面章节的基础上。但是,如果只安排两个学期来讲授全书,那么以下这些内容可以省略而不会影响教学的连续性。

- 系统性质(除了线性和时不变性)。
- 用傅里叶级数分析线性时不变系统对周期激励的响应。
- 傅里叶方法的一些应用,包括离散时间滤波器、一些调制技术、相位和群延时及谱分析。

- 采样方法(与采样理论相对的)。
- 离散时间信号的采样。
- 快速傅里叶变换算法。
- 第 8 章中所有关于相关性、能量谱密度和功率谱密度的讨论。
- 第 9 章末尾的双边拉普拉斯变换。
- 某些拉普拉斯变换的应用,如稳定性分析、方框图简化、巴特沃兹滤波器。
- 连续时间和/或离散时间系统的标准实现和状态空间分析。
- 第 11 章末尾的双边 z 变换。
- 用 MATLAB 进行数字滤波器设计。

审阅和编辑

我经常告诉我的学生,如果他真的想学好某一门课程,那么他就应该尝试着去讲授这门课程。在众人面前讲课是一件非常锻炼人的事。但在写完本书后,我要对我的说法进行补充,那就是如果一个人想要很好地掌握一门课程,那他就应该为这门课程写一本教材。审阅的过程在一定程度上也是一种类似的锻炼,只不过没有那么公众化,公众的评论要在书出版之后才会出现。本书的出版很大程度上归功于各位审阅者,尤其是那些花了很多时间提出评价并给出改进意见的审阅者。在此我表示深深的感谢。

同时感谢过去几年里学习我这门课程的许多学生。我相信我们之间更多的是一种互利的关系,他们从这里学习信号与系统分析,而我从他们那里学习如何教授信号与系统分析。有无数次学生问我一些非常敏锐的问题,而这些问题不仅仅体现出学生对概念的不理解,同时也反映出我以前对这些概念理解得不够。

写作风格

每个作者都认为自己的写作方式有助于学生对内容的理解,我也不例外。我教授这门课程多年,通过课程测试我知道哪些内容学生已经掌握而哪些内容学生没有掌握。在办公室里我花费了无数的时间向学生面对面地解释某些概念,正是通过这些教学实践,我了解哪些内容需要反复强调。在写作中,我尽量以直接对话的方式将理论介绍给读者,避免一些不必要的形式,并希望在一定程度上尽量消除那些在学生中容易存在的误解和错误。变换理论不是一种易于理解的概念,在第一次接触这些理论时,学生往往会因为概念的抽象性而陷于困惑之中,从而忽略了分析系统对信号响应的真正目的。正如所有作者一样,考虑到易懂性和数学严密性都十分重要,因此在写作中我尽量将两者完美地结合起来。我相信我的著作是简明清晰的,但最终的判断应取决于读者。

习题

本书包含 500 多道习题。每章后面的习题分为两组,第一组一定程度上作为训练使用,并给出了相应的习题答案;第二组习题具有较大难度,且没有提供答案。

结束语

尽管我努力使本书尽量完美,但任何书在第 1 版时都不可能是完美的。正如所有作者发现的一样,即使他们完全理解了书中的概念并会做所有的习题,在一本包含如此多内容和习题的书中,错误总是不可避免的。因而我欢迎任何批评、纠正和建议。所有的意见,包括那些我不同意的或者其他人不同意的,都将会对本书的下一版产生建设性影响,因为它们指出了问题。如果某些东西你觉得不正确,它也有可能困扰其他人,那么作为作者就有义务解决这些问题。因此,我希望在你的意见中直接而清楚地指出哪些内容需要修改,同时请不要隐瞒你发现的任何错误。

感谢以下为本书提供大量帮助的审阅者:

Ali Amini 加利福尼亚州立大学(California State University, Northridge)

Vijayakumar Bhagavatula 卡内基梅隆大学(Carnegie Mellon University)

Jose B. Cruz, Jr. 俄亥俄州立大学(Ohio State University)

Thomas S. Denney, Jr. 厄本大学(Auburn University)

Frank Gross 佛罗里达农机大学(Florida A&M University)

John Y. Hung 厄本大学(Auburn University)

Aziz Inan 波特兰大学(University of Portland)

James S. Kang 加利福尼亚理工学院,波莫纳(Cal Poly Pomona)

Thomas Kincaid 波士顿大学(Boston University)

Wojtek J. Kolodziej 俄勒冈州立大学(Oregon State University)

Darryl Morrell 亚利桑那州立大学(Arizona State University)

Farzad Pourboghra 南伊利诺伊大学(Southern Illinois University)

Lee Swindlehurst 杨百翰大学(Brigham Young University)

迈克尔 J. 罗伯兹,教授
电气与计算机工程系
田纳西州大学,诺克斯维尔

目 录

译者序
前言

第 1 章 概论	1
1.1 信号与系统的定义	1
1.2 信号的类型	1
1.3 信号和系统的一个例子	6
1.4 MATLAB 的使用	10
第 2 章 信号的数学描述	11
2.1 概述	11
2.2 连续时间函数和离散时间函数	12
2.3 连续时间信号函数	13
2.4 函数和函数的组合	23
2.5 连续时间缩放和时移变换	25
2.6 微分与积分	32
2.7 连续时间偶函数与奇函数	34
2.8 连续时间周期函数	40
2.9 离散时间信号函数	42
2.10 离散时间缩放和时移变换	47
2.11 差分与累加	52
2.12 离散时间偶函数和奇函数	54
2.13 离散时间周期函数	56
2.14 信号能量和功率	56
2.15 要点总结	61
习题一	61
习题二	71
第 3 章 系统的描述与分析	79
3.1 概述	79
3.2 系统特性	81
3.3 LTI 系统的特征函数	93
3.4 模拟	95
3.5 卷积和	95
3.6 卷积积分	109
3.7 微分或差分方程的框图模拟	121
3.8 要点总结	122
习题一	123
习题二	128
第 4 章 傅里叶级数	133
4.1 概述	133
4.2 连续时间傅里叶级数	133

4.3 连续时间傅里叶级数的计算	141
4.4 连续时间傅里叶级数的性质	152
4.5 变换对表和性质的应用	161
4.6 有限带宽信号	163
4.7 连续时间傅里叶级数的收敛性	163
4.8 离散时间傅里叶级数	165
4.9 离散时间傅里叶级数的性质	170
4.10 离散时间傅里叶级数的收敛性	177
4.11 LTI 系统对周期激励的频率响应	180
4.12 要点总结	182
习题一	183
习题二	186
第 5 章 傅里叶变换	189
5.1 概述	189
5.2 连续时间傅里叶变换	189
5.3 傅里叶变换的收敛和广义傅里叶变换	195
5.4 连续时间傅里叶变换和连续时间傅里叶级数的比较	196
5.5 连续时间傅里叶变换的性质	198
5.6 离散时间傅里叶变换	214
5.7 离散时间傅里叶变换的收敛性	217
5.8 离散时间傅里叶变换的性质	217
5.9 几种傅里叶分析方法之间的联系	224
5.10 要点总结	237
习题一	237
习题二	250
第 6 章 信号与系统的傅里叶变换分析	253
6.1 概述	253
6.2 频率响应	253
6.3 理想滤波器	255
6.4 实用的无源滤波器	266
6.5 对数幅频响应图和波特图	270
6.6 实用的有源滤波器	278
6.7 离散时间滤波器	283
6.8 滤波器指标和指标图	287
6.9 通信系统	291
6.10 频谱分析	304
6.11 要点总结	307

习题一	307	10.2 由电路和系统框图得到传递函数	441
习题二	314	10.3 系统稳定性	443
第7章 采样和离散傅里叶变换	319	10.4 并联、级联和反馈连接	444
7.1 概述	319	10.5 反馈系统分析	447
7.2 采样方法	319	10.6 方框图简化和梅森定理	462
7.3 连续时间信号的采样	322	10.7 系统对标准信号的响应	465
7.4 离散时间信号的采样	334	10.8 零极点图和频率响应的图解法	470
7.5 带限周期信号	338	10.9 巴特沃兹滤波器	473
7.6 离散傅里叶变换及其与其他 傅里叶方法的关系	340	10.10 频率变换	474
7.7 使用离散傅里叶变换的实例	347	10.11 使用 MATLAB 设计模拟滤波器	477
7.8 快速傅里叶变换	356	10.12 系统的标准实现	479
7.9 要点总结	359	10.13 状态空间信号与系统分析	481
习题一	359	10.14 要点总结	487
习题二	370	习题一	488
第8章 相关、能量谱密度和功率谱 密度	373	习题二	495
8.1 概述	373	第11章 z 变换	501
8.2 相关性与相关图	373	11.1 概述	501
8.3 相关函数	377	11.2 z 变换的发展	501
8.4 自相关性	385	11.3 z 变换的性质	505
8.5 互相关性	393	11.4 z 逆变换	512
8.6 相关与傅里叶级数	396	11.5 带初始条件差分方程的求解	514
8.7 能量谱密度	396	11.6 z 变换和拉普拉斯变换之间的关系	515
8.8 功率谱密度	398	11.7 双边 z 变换	517
8.9 要点总结	403	11.8 要点总结	520
习题一	403	习题一	520
习题二	406	习题二	523
第9章 拉普拉斯变换	409	第12章 信号与系统的 z 变换分析	525
9.1 概述	409	12.1 概述	525
9.2 拉普拉斯变换的发展	409	12.2 传递函数	525
9.3 拉普拉斯变换的性质	416	12.3 系统稳定性	526
9.4 用部分分式展开法求解拉普拉斯 逆变换	422	12.4 并联、级联和反馈连接	527
9.5 拉普拉斯变换和傅里叶变换的 等价性	429	12.5 系统对标准信号的响应	527
9.6 带有初始条件的微分方程的求解	429	12.6 零极点图和频率响应的图解法	532
9.7 双边拉普拉斯变换	430	12.7 带反馈的离散时间系统	535
9.8 要点总结	434	12.8 用 DT 系统模拟 CT 系统	537
习题一	434	12.9 数据采集系统	538
习题二	437	12.10 数字滤波器	542
第10章 信号与系统的拉普拉斯变换 分析	441	12.11 用 MATLAB 设计和实现数字 滤波器	566
10.1 概述	441	12.12 系统的标准实现	567
		12.13 状态空间信号与系统分析	569
		12.14 要点总结	574
		习题一	574
		习题二	581
		参考书目	584

第 1 章 概 论

1.1 信号与系统的定义

“千里之行，始于足下”，本书的内容是关于信号和系统的，因而我们第一个要回答的问题是：“什么是信号与系统？”所谓信号是指任何试图传送某种信息的时变物理现象，例如：人声、犬吠、狮吼、鸟鸣、烟雾信号、鼓声、手语、摩尔斯电码(Morse code)以及交通信号等。现代高速信号包括：电话线中的电压、无线电设备或者电视发射机发出的电场、电话或计算机网络中光纤内光强度的变化。有时被称为随机信号的噪声类似于信号，也是一种时变物理现象，但是它并不像信号那样经常携带有用信息，因而人们并不希望噪声存在。

信号总是由系统进行处理或在系统上运行。当一个或多个激励信号作用到系统的一个或多个系统输入端时，系统就会在输出端产生一个或多个响应信号。图 1-1 给出了一个单输入单输出系统的框图。

在通信系统中，发射机是一种用来产生信号的装置，而接收机是用来接收信号的装置。信道是信号和/或噪声从发射机和/或噪声源传送到接收机的路径，如图 1-2 所示。发射机、信道和接收机各自都是系统，同时它们是整个系统的组成部分或者子系统。其他类型的系统使用信号分析的方式来处理信号。科学仪器用来测量物理现象(如，温度、压力、速度等)并将那些物理现象转换成诸如电压或电流的信号。商业大厦的控制系统、工厂的过程控制系统、飞机中的电子设备以及汽车中的点火和燃油泵送控制系统等，都是处理信号的系统。

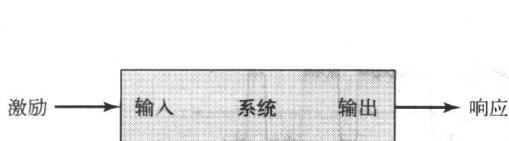


图 1-1 简单系统的框图

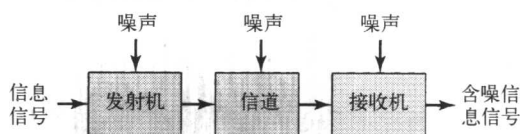


图 1-2 通信系统

术语系统涵盖的范围中，甚至有一些可能被认为不是系统，比如：股票市场、政府部门、天气和人体等，其实它们都是系统。它们都会对激励做出响应。有一些系统可以轻易地进行详细分析，而有一些系统只能进行近似分析，还有一些系统太复杂以至于我们几乎不知道如何去理解和控制它们。

1.2 信号的类型

对信号的广义分类有以下几种：连续时间信号和离散时间信号、连续值信号和离散值信号、随机信号和非随机信号。连续时间信号是在某一时间段内其每个瞬间都有确定值的信号。连续时间信号的另一个常用名称是模拟信号，之所以称为“模拟”是因为在许多系统中，模拟信号随时间的变化特性与一些被测量或监测的物理现象相类似。

信号的采样过程是指在离散时间点对信号进行取值，并用这些采样值来表示原始的连续时间信号。这些取自连续时间信号的采样值集合就是离散时间信号的一个例子。离散时间信号也可以由一个仅在离散时间点上产生信号值的离散时间系统来生成。离散时间信号仅在离散时间点上具有确定值，而在离散时间点之间是没有值的。在第 7 章中我们将研究：在什么样的条件下，一个由连续时间信号采样得到的离散时间信号可以认为是该原始连续时间信号的充分表示法。

连续值信号是指该信号的值可以在一个连续集内任意取值，这个连续集可以是有限范围也可以是无限范围的。一个连续集是指在允许范围内所有无“间隔”数值的集合，两个允许的数值之间的距离可以任意小。整个实数集是一个具有无限范围的连续集，而位于 0 和 1 之间的实数集是一个有限范围的连续集，这两个连续集都具有无限多的元素。

离散值信号仅能从一个离散数值集中取值。离散数值集是指在该集合中，在允许值范围间存在有限空间，换句话说，在这个集合中任意两个数值之间的差大于某一个正数。整数集是离散数值集的一个例子。离

散时间信号经常以数字信号形式进行传送。离散时间信号值的序列以某种经过编码(往往是二进制)的数字形式传输时,要用到术语数字信号。术语数字有时候也粗略地指只有两个可能取值的离散值信号。

随机信号是一种信号值不能被准确预测并且不能由任何数学函数描述的信号。非随机信号也叫确定性信号,是一种可以由数学描述的或至少可以近似描述的信号。如前所述,随机信号也往往被称作噪声。图 1-3~图 1-5 给出了不同类型信号的例子。

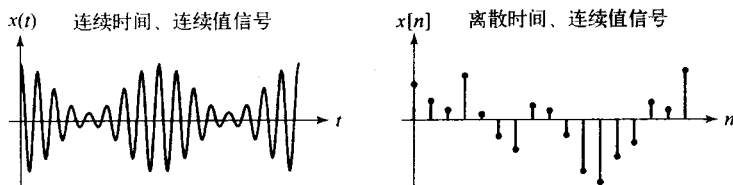


图 1-3 连续时间和离散时间信号的例子

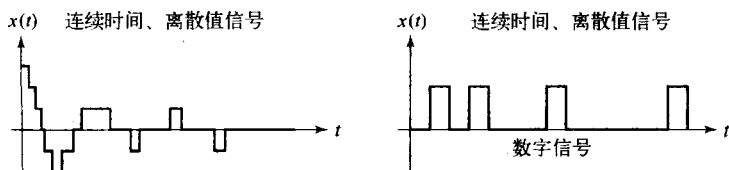


图 1-4 连续时间和数字信号的例子

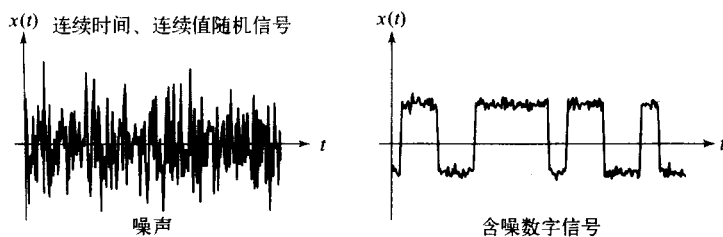


图 1-5 噪声和含噪数字信号的例子

在实际信号处理中信号的采集一般使用计算机,通常包括以下几个步骤:采样、量化和编码(如图 1-6 所示)。原始信号往往是连续值、连续时间的信号。采样过程是使信号的时间离散化,从而得到连续值、离散时间信号。量化过程是使采样信号的值离散化,即对每一个采样值从有限离散数值集中选择一个与它最接近的数值来近似,从而得到离散值、离散时间信号。然后把各个离散时间、离散数值的信号值转换成一系列矩形脉冲,这些矩形脉冲将离散数值集中的成员编码成二进制数,从而得到离散值、连续时间信号,通常称作数字信号[这里需要注意的是,图 1-6 中所示的几个步骤通常可由单个器件——模数转换器(ADC)——完成,并且中间步骤的信号在 ADC 外部是无法得到的。事实上,由于转换实现的方式,这些信号甚至在 ADC 内部也是不存在的。然而,对 ADC 转换过程的分析按采样、量化和编码三个独立步骤进行往往是有用的]。

二进制数字信号一个非常普通的应用是用美国信息交换标准码(ASCII)来传送文本信息。ASCII 码包括字母表中的字母、数字 0 到 9、一些标点符号和几个非打印控制字符,总共 128 个字符,都被编码成 7 比特序列。在 ASCII 信息的异步串行传输中,这 7 个比特被顺序地传送,同时为了保证接收同步,会在这 7 个比特的前面加上一个起始位,后面加上 1 个或者 2 个停止位。在某些情况下还会传送额外的一位——奇偶校验位。奇偶校验位可用来检测传输错误。典型地,在数字设备直接连接的情况下,比特值一般用电平来表示,高电平(通常在 5V 左右)表示 1,低电平(通常在 0V 左右)表示 0。使用一个起始位、一个结束位、无奇偶校验位的异步传输方式传送信息“SIGNAL”时,电压随时间的变化如图 1-7 所示。

随着数字系统的不断普及,在现代信号分析中,数字信号变得越来越重要。数字信号具有更强的抗噪声性能。这一点可通过对图 1-7 中的数字信号加入不同能量的噪声来说明(参见图 1-8)。在图 1-8 所示的最坏情况下,由于噪声的原因,虽然已经很难用肉眼区分出二进制信号 1 和 0,但实际上还是能从二进制比特流中正确地检测出所有的 1 和 0,从而使检测后接收的二进制信号依旧保持完好。在如图 1-9 所示的二进制信号

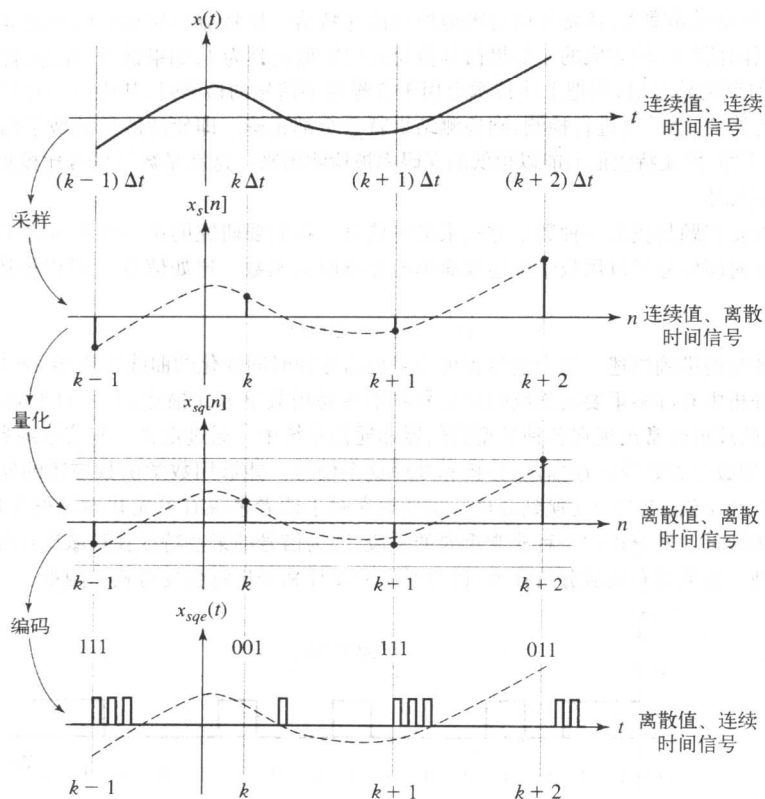


图 1-6 信号采样、量化和编码中不同信号类型的图解

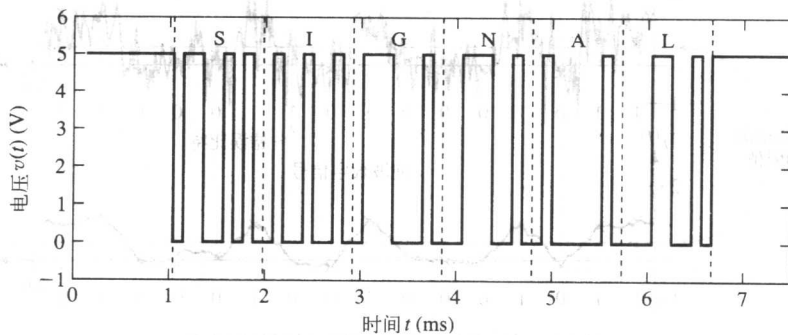


图 1-7 信息“SIGNAL”的异步串行二进制 ASCII 码的电压信号

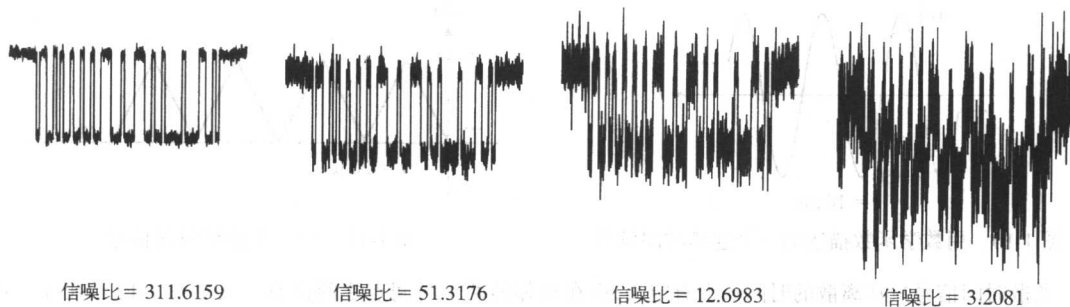


图 1-8 含噪数字 ASCII 信号

通信中,即使当噪声变得非常大,还是可以清晰地检测出比特值。比特流中比特值的检测通常是通过某个预定时刻信号值与门限值的比较完成的。如果信号值超过门限值就判为1,如果低于门限值就判为0。在图1-9中, x 轴表示检测时刻的信号值,当把上述技术应用于含噪数字信号的检测时,其中一个比特值被误判。但是如果先对信号进行滤波,然后再进行检测,则检测结果就会全部正确。即使滤波后的数字信号与无噪数字信号相比,还不是很干净,但比特值依旧能以很低的误码率被检测出来。这就是数字信号比模拟信号具有更强的抗噪声性能的基本原因。

信号分析的首要问题是找出一种数学方式来描述信号。我们要研究的第一类信号将是确定性的连续时间信号。一些连续时间信号可以用数学描述成简单的连续时间函数。比如信号 x 可以描述成连续时间 t 的函数,即

$$x(t) = 50 \sin(200\pi t) \quad (1-1)$$

这是信号在每个瞬时的准确描述。这个信号也可以采用信号随时间变化的曲线来描述(图1-10)。

信号与系统分析中有许多重要的连续时间信号并不容易用数学方式描述,图1-11所示的信号就是一个例子,而与此相似的波形经常出现在各种类型的仪器和通信系统中。通过定义一些信号函数和一个称之为卷积的运算,就可以用数学方式简洁地描述、分析和处理这个信号。能够用数学函数描述的连续时间信号可以通过连续时间傅里叶变换(CTFT)变换到频域。虽然现在对于读者来说有可能并不是很清楚变换是什么,但是将信号变换到频域是信号分析中一种非常重要的手段,因为信号的某些特征在频域比在时域可以观察的更清楚也更容易处理。如果没有频域分析技术,许多系统的设计和分析将会变得相当困难。

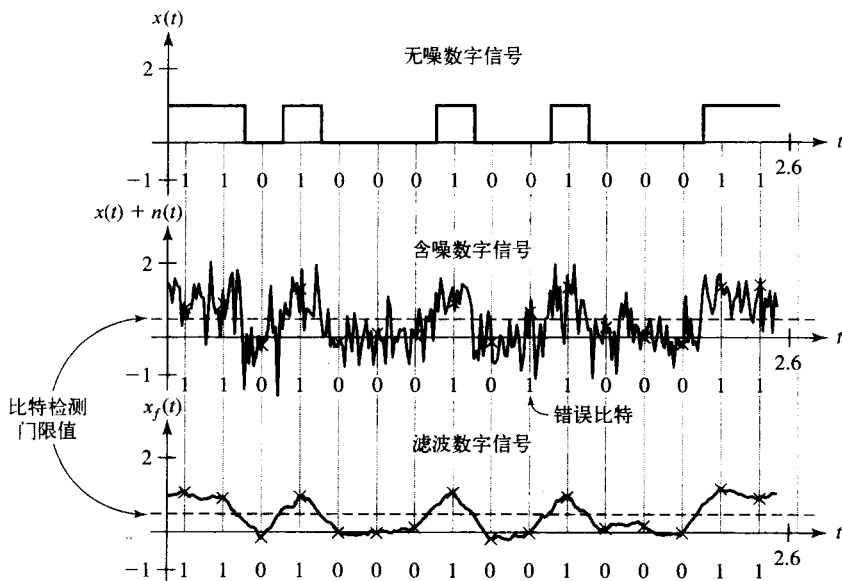


图 1-9 使用滤波器降低数字信号误码率

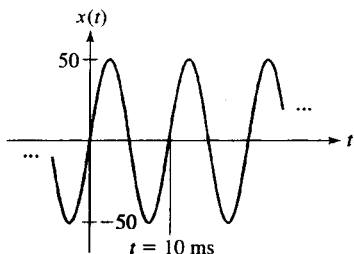


图 1-10 用数学函数描述的一个连续时间信号

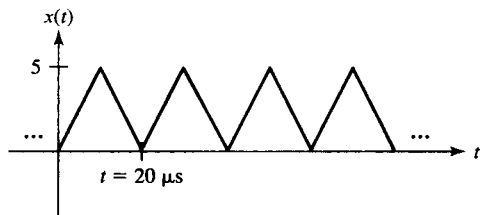


图 1-11 另一个连续时间信号

离散时间信号只在离散的时间点上有定义,而在相邻的两个时间点之间没有定义。图1-12给出了一些离散时间信号的例子。图中除了右下角的信号看起来像随机信号外,其他的都像确定性信号(之所以说看起

来像,是因为我们永远无法根据有限时间的一段信号来断定信号是随机的或非随机的)。在第7章里我们将研究连续时间信号和经采样连续时间信号得到的离散时间信号之间的关系。

随机信号不能用数学函数来准确描述。事实上,除了枚举随机信号的每个值之外并没有一个通用的方式来完整地描述随机信号。对于连续时间随机信号枚举是不可能的,因为即使在有限时间段内,连续时间信号也存在无限多的信号值。准确地描述有限时间段内的离散时间随机信号却是可能的,即可以用有限长度时间序列来描述。但是,即使某段时间内的离散时间随机信号已经被描述出来,也并不意味着在其他有限时间段内的信号是已知的或已被描述的。

虽然随机信号不能用数学函数来准确描述,但它们近似描述却是可能的。图1-13给出了4个不同的随机连续时间信号。虽然这些信号都是随机的,但它们具有明显不同的特性。它们具有不同的变化范围;有些信号变化非常快,而有些变化相对较慢;它们的值具有不同的分布;具有不同的均值等。

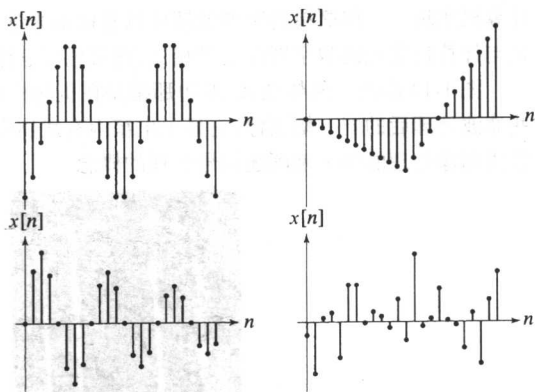


图 1-12 一些离散时间信号

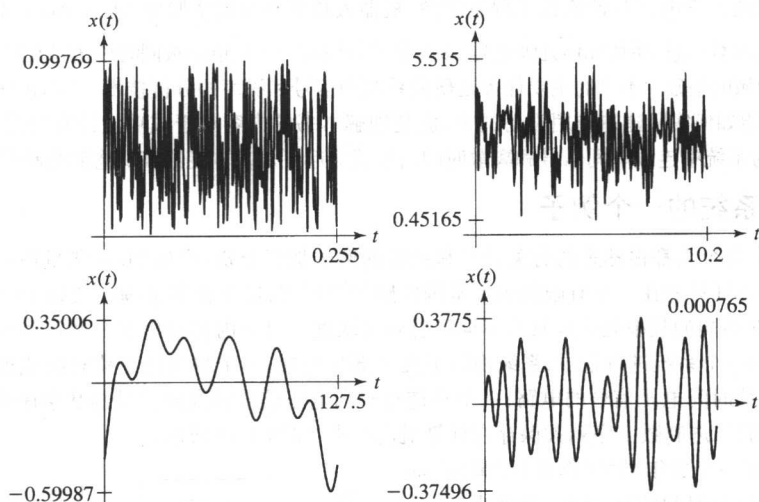


图 1-13 4个连续时间随机信号

在分析随机信号以及它们与系统之间的相互作用时,需要使用随机信号的描述符。描述符可以近似描述随机信号的某些重要特征但不能给出它的准确描述。利用描述符可以表示出图1-13中4个随机信号特性间的重要区别。描述和分析随机信号的最好方式是使用描述符。尽管描述符不能准确地描述信号,但在绝大多数实际情况下的系统设计中,它们是对完成目标非常有效的。

在本书中我们将会看到许多系统对严格确定性信号操作的例子,因为这是系统设计的一个重要部分,它可以帮助我们了解系统操作。但是最终大多数系统的设计是为了处理某类信号,而不是任何确切的信号。

到目前为止,我们所讨论的信号在数学上都被描述为时间的函数,但还存在另一类重要的信号,它们是空间而不是时间的函数,如图像。本书中绝大多数的信号理论、它们所传递的信息、系统对它们进行处理的方式,都是基于物理量随时间变化的信号。但是只需要对所发展而成的理论和方法做很小的修改就可以应用于图像处理中。时间信号往往被描述成物理量随一个独立变量——时间变化的函数。空间信号或图像往往被描述成物理量随两个正交的、独立的、空间变量变化的函数,这两个空间变量习惯性地用 x 和 y 表示,所描述的物理量通常是光或者某些影响光传输和反射的变量。但是图像处理技术也适用于任何可以用具有两个独立变量的函数来描述的信号。

历史上,图像处理技术总是落后于信号处理技术,因为事实上从一幅典型图像中采集信息所需处理的信

息量远远大于从一个典型时间信号中获得信息所需要的信息量。但是现在随着计算机处理能力的极大提高以及计算机成本的大幅降低,在许多场合下图像处理日益成为一种实用技术。许多图像处理是数字的并且由计算机实现。一些简单的图像处理可以直接由光学方式完成,并且这样处理速度也可以非常快(光速!)。但是与计算机实现的数字图像处理相比,直接的光学图像处理在灵活性方面具有很大的局限性。

图 1-14 给出了两幅图像,左边那幅是在机场检查站,一个手提箱的未经处理的 X 光图像,右边是经过一些滤波处理后的同一幅图像,它显示出箱内有武器存在。本书将不对图像处理做任何深入讨论,但偶尔也会使用图像处理的例子来阐述信号处理的概念。

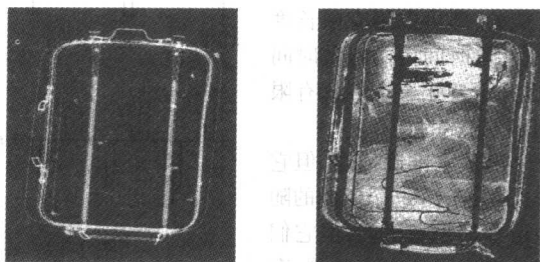


图 1-14 一个经图像处理来显示信息的例子[原始 X 光图像以及处理过后的图像由诺克斯维尔田纳西大学电气与计算机工程系图像、机器人技术与智能实验室 M. A. Abidi 提供]

理解信号如何承载信息、系统如何处理信号、多个信号如何在一个信道中被同时传送以及噪声如何干扰信息的传输是多个工程领域的基础。本书的主要任务是研究系统中信号和噪声的分析技术。本书可认为是一本应用数学教材,而不是介绍如何实际建造有用设备的书,但是理解本书的内容对于成功设计有用设备是非常重要的。本书以下的内容为系统中连续时间信号和离散时间信号建立起了从基本定义和概念到分析技术的整个领域。

1.3 信号和系统的一个例子

让我们举一个每个人都熟悉的有关信号和系统的例子加以分析:产生和/或测量声音信号的系统。声音由人耳感知,而人耳只能在一个有限的频率范围内感知声压波,这个频率范围一般是 15 赫兹(Hz)到 20 千赫兹(kHz),并且在不同的频率处人耳具有不同的感知灵敏度。以下内容给出了一些产生普通声音的气压变化图。这些声音由一个系统进行记录,系统由以下几个部分组成:一个将气压变化转换成连续时间电压信号的麦克风;处理连续时间电压信号的电路;一个将连续时间电压信号转变成二进制数字序列形式的数字信号的模数转换器,最后二进制数字序列被保存在计算机内存中(如图 1-15 所示)。

图 1-16 给出了一个成年男性(作者)读单词“signal”时声压信号随连续时间的变化图。虽然声音信号的分析本身是一个很大的课题,但是声压变化图和人耳将这个词感知为“signal”之间的关系还是可以从图中看出来。图中有 3 个可识别的信号段:第一段从 0 到大约 0.12 s,第二段大约从 0.12 s 到 0.19 s,第三段大约从 0.22 s 到 0.4 s。第一段对应“signal”的“s”音,这是一个摩擦音,它与其他几段(浊音)有不同的特征。第二段对应“i”音。第二段和第三段之间对应双辅音“gn”。辅音在语音中起到分割元音的作用。“g”结束“i”音,而“n”是“a”音的开始。第三段对应“a”音,并由辅音“l”结束。“l”与其他辅音,如“b”和“p”不同,并不是爆破音,因而声音并不是马上停止而是慢慢衰减。从图中可以看出,“s”音的气压变化速度要快于“i”音和“a”音。在信号分析中,我们说它具有更多的高频成分。从“s”音的放大图中可以看出气压变化信号类似随机信号。“i”音和“a”音具有不同性质,它们的变化比较慢,而且看起来更有规律或可预测性(尽管不可严格预测)。“i”音和“a”音由声带振动产生,因而呈现出近似振荡特性。由此我们将“i”音和“a”音称为音调音或浊音,而“s”音不是。所谓音调音是表示该声音存在基音频率,这种描述在数学上不很精确,但却是非常实用的。

另一种观察信号的方式是在频域检测信号中存在的频率或者基音信息。描述信号功率随频率变化的一

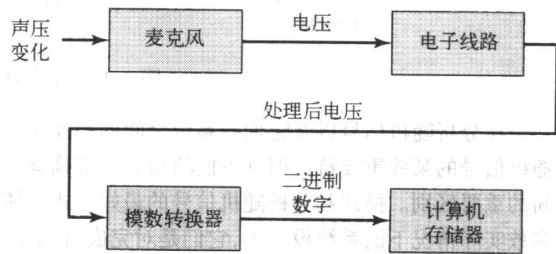


图 1-15 录音系统