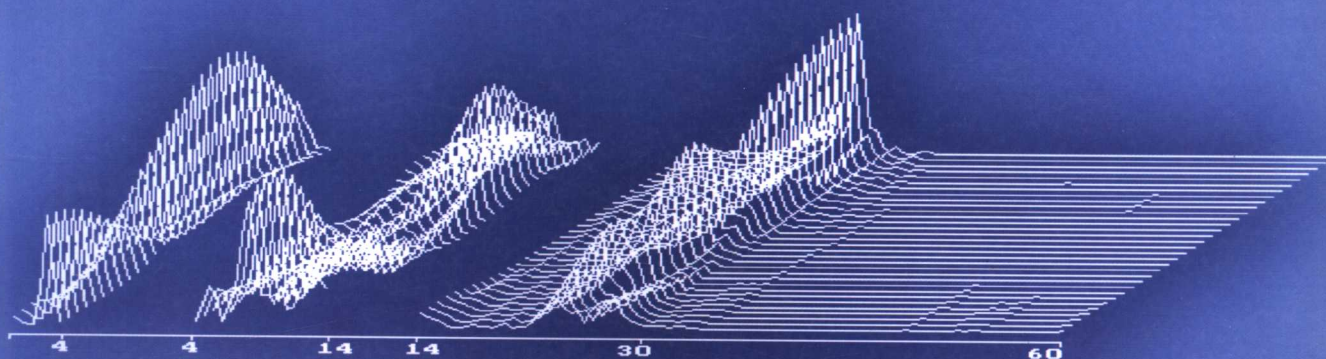


聂 能 尧德中 谢正祥 主编

生物医学信号数字 处理技术及应用



科学出版社
www.sciencep.com

生物医学信号数字处理技术及应用

聂 能 尧德中 谢正祥 主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书论述了生物医学信号数字处理技术的基本理论和主要应用。内容兼顾了纵向的深度和横向的广度,应用方面强调范围广而实用性强,具有先进性、简明性、实用性和专业性。本书既介绍了经典信号数字处理的理论和技术,又介绍了现代信号数字处理的理论和技术。内容涉及生物医学信号数字处理的各主要方面,包含了属于现代医学信号处理技术热点和难点的诱发电位的单次提取技术和信号处理技术在基因信息处理中的应用等。

本书除了可作为刚进入生物医学工程领域,特别是生物医学数字信号处理领域的科技与教育工作者,以及相关领域或对其感兴趣的医务工作者的入门参考书外,还可作为高等院校生物医学信号处理课程的教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

生物医学信号数字处理技术及应用/聂能,尧德中,谢正祥主编. —北京:科学出版社, 2005

ISBN 7-03-014969-6

I. 生… II. ①聂… ②尧… ③谢… III. 数字信号-信号处理-应用-生物医学工程 IV. R318

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 008064 号

责任编辑:王 静 王日臣/责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2005年8月第一次印刷 印张:23 1/4

印数:1—3 000 字数:528 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

编著者名单

主 编：聂 能 尧德中 谢正祥

学术秘书：吕霞付

参 编 者 (按汉语拼音排序):

李 凌	博士	电子科技大学	生命科学与技术学院
李章勇	博士	重庆邮电学院	生物信息学院
吕霞付	博士	重庆邮电学院	生物信息学院
聂 能	教授	重庆邮电学院	
谢正祥	教授	重庆医科大学	生物医学工程研究室
尧德中	教授	电子科技大学	生命科学与技术学院

前 言 一

生物医学信号数字处理技术是现代医学诊断和治疗设备的核心支撑技术之一，近年来已有长足的进步。但是国内外都非常缺乏这方面的著作，特别是能与时俱进地跟上技术发展并具有适度深度的、覆盖面广的、实用性强的著作。由电子科技大学、重庆邮电学院、重庆医科大学的科研、教学第一线人员（专家）撰写的《生物医学信号数字处理技术及应用》一书，一定程度上可以填补这方面的空白。

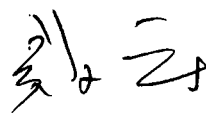
翻开这本专著就会发现它具有先进性、简明性、实用性和专业性四大特点。它既有纵向的深度，介绍了自适应干扰对消技术（第八章）、时频分析技术、小波分析技术，高阶谱分析技术以及独立成分分析技术在医学信号处理中的应用（第十一章）；又有横向的广度，内容覆盖了生物医学信号处理的各主要方面。如在生物电信号处理方面，除了心电信号处理外，还介绍了骨骼肌电信号处理、平滑肌电信号处理和神经系统电信号处理；在生物医学声信号处理方面，介绍了心音信号处理、肺音信号处理和肌音信号处理；在压强信号处理方面，既介绍了静态血压信号处理技术，又介绍了动态血压处理技术；除了介绍机体产生的主动信号的处理外，还介绍了诱发脑电信号的处理（第七章，第十六章）和诱发信号的处理，如阻抗信号处理（第十五章）；除了介绍传统的线性信号处理技术外，还简明地介绍了非线性信号处理技术（第四章和第十一章）。除了介绍了属于现代医学信号处理技术的热点和难点的诱发电位的单次提取技术（第八章和第十二章）外，还首次介绍了基因信息处理中的信号处理技术（第十七章）。

本书还特别强调了生物医学信号数字处理技术不同于一般工程数字信号处理的重要差别：因为它处理的客体是有生命的生物体，是人，而不是机具。尤其强调了要“以人为本”、“安全与健康是第一位的”；特别介绍了隔离、浮置技术和操作环境（对象浮置和设备的本地接地）等特殊设计问题（绪论、第一章）；还专门介绍了医学信号处理中遇到的一些特殊问题，如介质的严重非均匀性和各向异性及近场性问题。有时电极位置略微移动一点，取得的信号就可能很不相同（心电的胸导联），甚至没有信号（第五章与第十二章）。

本书中许多内容都是作者在国家自然科学基金、省部级科学基金支持下的研究成果。在基础理论、基本技术和应用方面，都反映了作者的一些创造性的研究成果。如在理论方面，证明了频域二重相关（谱）定理，并在此基础上提出了正确的频域相干函数（第九章），论证了非线性变换对谱分布的影响（第四章）；在技术上创立了比较分带动态谱分析技术（第十二章），提出了自参考、自相关、自适应技术（第八章）；在应用方面，通过实验阐明了心动周期信号谱的超低频带的生理意义（第十二章），强调了医学信号处理必须注重提取确定性的成分，以便作出确定性的医学决策（绪论、第一章）。

本书对于生物医学工程工作者和相关领域的医务工作者有很好的参考价值，同时也可以作为生物医学工程专业高年级学生的教学和毕业设计参考书；尤其对于初入此领域的科研和教学的一线人员，可以说本书是及时雨、雪中炭。阅读是（对知识的）索取，著

作是对人类知识宝库的一种奉献，谨对本书作者们的辛勤劳动和奉献精神表示敬佩。



重庆邮电学院院长
重庆市电子学会理事长

前言 二

国内生物医学信号数字处理技术方面的著作, 多为 20 世纪 80 年代末或 90 年代后出版的, 时迁十余年, 跨越了一个世纪。如杨福生和高上凯主编的《生物医学信号处理》(高等教育出版社, 1992), 在应用方面主要涉及自发和诱发脑电、肌电以及超声等信号的处理; Tompkins 等的 *Biomedical Digital Signal Processing* (Prentice-Hall International, Inc. 1993) 一书, 由林家瑞、徐邦荃等翻译 (华中科技大学出版社, 2001), 该书在应用方面主要涉及的是心电信号处理; 谢正祥等撰写的《医学信号数字处理技术及应用》(科学技术文献出版社, 1992) 虽然涉及面略广一些, 但内容已不能反映近 10 余年来生物医学数字信号处理技术的长足进步, 也无法满足现在教学和科研的需要。因此, 对于刚刚跨入这一领域的教师、学生、科技人员以及相关的临床工作者, 常为觅得一本好的相关参考书而犯愁。事实上, 近几年上述著作的作者常常接到同行的求助信函, 正是这些信函驱动了本书的撰写和出版。

本书是在重庆邮电学院院长聂能教授的推动和组织领导下, 由电子科技大学、重庆邮电学院和重庆医科大学多所院校在生物医学工程专业一线的科研和教学工作者共同撰写而成。本著作在讨论确定框架性内容, 提出写作建议后, 采取开放式的写作方式, 鼓励创造性思维。本书在叙述上特别注重概念清楚、辨析明白、浅显易懂。内容上既兼顾经典又反映现代, 应用上强调范围广而实用性强。在介绍经典内容时结合生物医学信号处理实例, 在介绍应用时注意概念清楚、理论明晰。

生物医学数字信号处理技术是现代医学诊断和治疗的一种核心技术。希望本书能对生物医学工程工作者了解该领域起到抛砖引玉的作用, 特别是希望能作为刚从事生物医学信号处理科研和教学工作不久的同仁们的入门参考书, 使他们对该领域的工作有一个全面的了解。同时本书还可作为有兴趣于生物医学信号处理的医务工作者的入门向导。正是考虑到这部分科技工作者的需要, 本书以相当的篇幅介绍了与生物医学信号处理有关的经典信号处理基础知识(第一章至第三章, 第六章至第十章)和现代发展(第四、第十一章)。第十二章至第十七章介绍信号处理技术在生物医学领域各方面的应用, 如心血管系统电信号处理、生物医学声音信号处理、生物医学压强信号处理、生物医学阻抗信号处理、神经系统电信号处理、骨骼肌和平滑肌电信号处理。第十七章还简单介绍了一个崭新的领域——信号处理技术在基因和蛋白质信息处理中的应用。此外第五章介绍了与生物医学信号处理有关的、必须引起注意的一些问题, 如可动的体信号源特性、介质的非均匀性和各向异性、测量的近场性以及信号本身固有的非线性特性等。

本书还可作为高等院校“生物医学数字信号处理”课程的教学参考书。本书的基础部分(第一章至第三章, 第六章至第十章)可作为学生对信号处理专业基础课“温故而知新”之用。

本书的部分理论工作和应用材料取自电子科技大学生命科学与技术学院、重庆医科大学生物医学工程研究室和重庆邮电学院生物信息学院的同仁的科研和教学工作成果

(见各章参考文献), 在此谨对他们的辛勤劳动表示感谢。

虽然本书的作者都是在生物医学信号处理的科研和教学第一线工作, 但因生物医学信号处理是一个交叉性强、涉及面广的论题, 我们虽努力做得更好, 但诸多不足仍有待在未来的工作中不断完善。为便于听取广大读者和专家学者的意见, 在本前言之后, 列出各章节主要作者的联系方式。

最后, 感谢编者各所在单位及领导, 特别是重庆邮电学院院长聂能教授全方位的支持, 没有他的具体领导和在经费上的支持, 很难想像能顺利完成这部著作。还要特别感谢科学出版社的大力支持和帮助, 特别是王静编辑的热情、细心指导。此外对重庆医科大学生物医学工程研究室博士生牛永红、马厚勋参加了第十七章的部分写作工作, 重庆医科大学生物医学工程研究室研究生华明娟, 重庆邮电学院生物医学工程专业王志芳、李虹、党小娟、刘玉红、龚琼、董萍、陈园园、王景骞、邹南兵、王艳丽、刘巧燕等同学协助校稿、部分文字处理和图形绘制工作表示感谢。

编 者

2004 年 10 月 31 日

主要作者联系方式

聂 能教授	重庆邮电学院 院长、硕士生导师	nieneng@cqupt.edu.cn
尧德中教授	电子科技大学生命科学与技术学院院长、博士生导师	dyao@uestc.edu.cn
谢正祥教授	重庆医科大学生物医学工程研究室 博士生导师	bmezxie@public.cta.cq.cn
吕霞付博士	重庆邮电学院生物信息学院 副教授	fxl_lxf@163.com
李章勇博士	重庆邮电学院生物信息学院	li9547@yahoo.com.cn
李 凌博士	电子科技大学生命科学与技术学院	liling@uestc.edu.cn

目 录

前言一	
前言二	
绪论	1

第一部分 生物医学数字信号时域处理

第一章 生物医学信号检测基础	11
第一节 生物医学传感器简介	11
第二节 生物医学信号的放大器	14
第三节 生物医学信号的数字化	17
第四节 生物医学信号获取与处理系统的基本组成	20
第五节 生物医学检测中的干扰与噪声	22
参考文献	23
第二章 确定性信号的描述	24
第一节 信号的时域和变换域描述	24
第二节 信号的正交函数表示法	28
第三节 信号的离散化	36
参考文献	39
第三章 随机信号的描述	40
第一节 随机信号	40
第二节 随机信号的古典表示法	42
第三节 随机信号的现代建模法	46
参考文献	57
第四章 非线性信号的特征和表示法	58
第一节 分形体和分维数	58
第二节 混沌特征及其定量描述	60
第三节 复杂性和复杂度	65
参考文献	71
第五章 生物医学电源模型和三维问题	72
第一节 生物电信号源的偶极子模型	72
第二节 传输介质和导联系统	75
第三节 一维信号参数测量	80
第四节 二维信号及合成	84
第五节 三维信号及合成	86
参考文献	86

第六章 数字相关和数字卷积	87
第一节 线性相关	87
第二节 循环相关	90
第三节 相干函数与相干系数	92
第四节 线性卷积	95
第五节 循环卷积	99
第六节 相关技术的应用	102
参考文献	106
第七章 维纳滤波和卡尔曼滤波	107
第一节 维纳滤波器的时域解	108
第二节 维纳预测器	115
第三节 维纳滤波器的应用	119
第四节 卡尔曼滤波的信号模型	122
第五节 卡尔曼滤波方法	124
第六节 卡尔曼滤波器的应用	127
参考文献	130
第八章 生物医学信号时域数字滤波中的一些问题	131
第一节 噪声和干扰	131
第二节 加权平均滤波	136
第三节 周期平均滤波	139
第四节 叠加平均滤波	140
第五节 同态信号滤波	144
第六节 自适应滤波	145
参考文献	151

第二部分 生物医学数字信号频域处理

第九章 傅里叶变换和频域分析	155
第一节 傅里叶变换及其意义	155
第二节 快速傅里叶变换	158
第三节 傅里叶变换的性质	164
第四节 频域分析	169
第五节 频域分辨率和谱图表示	175
第六节 幅值平方相干函数	178
第七节 频域滤波	187
参考文献	188
第十章 随机信号频域分析	190
第一节 功率谱估计的古典法	190
第二节 现代谱分析法	195
参考文献	196

第十一章 现代信号处理技术	197
第一节 时频分析.....	197
第二节 高阶谱分析.....	199
第三节 小波分析基础.....	200
第四节 独立成分分析技术.....	209
参考文献.....	220

第三部分 生物医学信号数字处理技术的应用

第十二章 心血管系统电信号处理	225
第一节 常规心电信号数字处理.....	226
第二节 心电监测.....	232
第三节 高频心电信号处理.....	235
第四节 运动心电信号处理.....	237
第五节 心房和心室晚电位信号检测.....	239
第六节 房颤波分析.....	245
第七节 多点电位标测.....	248
参考文献.....	250
第十三章 声音信号处理	251
第一节 心音信号处理.....	251
第二节 肺音和呼吸音信号处理.....	253
第三节 关节音信号处理.....	257
第四节 肌音信号处理.....	258
参考文献.....	258
第十四章 压强信号处理	260
第一节 概述.....	260
第二节 血压直接测量法.....	261
第三节 血压间接测量.....	262
第四节 动态无创血压测定.....	266
参考文献.....	266
第十五章 阻抗信号测量与分析	267
第一节 生物阻抗测量的基本原理.....	267
第二节 生物阻抗测量的基本方法.....	269
第三节 生物阻抗测量的应用.....	285
参考文献.....	286
第十六章 神经和肌电信号的测量与处理	288
第一节 脑电信号的采集与处理.....	288
第二节 骨骼肌电信号处理.....	297
第三节 诱发电位信号的处理.....	300
第四节 自主神经系统功能测定.....	304

第五节 胃电信号处理.....	318
参考文献.....	327
第十七章 基因和蛋白质信息处理中的信号处理技术.....	329
第一节 相关分析——比对.....	329
第二节 蛋白质结构和功能预测中的信号处理技术.....	330
第三节 DNA 结构和功能预测中的信号处理技术	333
第四节 DNA 模体和内切核酸酶酶切位点的查找	337
第五节 基因型和表现型.....	337
参考文献.....	341
中英文名词对照.....	342

Contents

Forward I

Forward II

Introduction 1

PART A BIOMEDICAL DIGITAL SIGNAL PROCESSING IN TIME DOMAIN

Chapter 1 Basis on biomedical signal measurement	11
Section 1 Introduction to Biomedical transducer	11
Section 2 Biomedical Signal Amplifier	14
Section 3 Digitization for Biomedical Signal	17
Section 4 Fundamental Configuration of Biomedical Signal Acquiring and Processing System	20
Section 5 Interferences and Noises in Biomedical Measurement	22
Reference	23
Chapter 2 Deterministic signal representation	24
Section 1 Signal Representation in Time and Transform Domain	24
Section 2 Orthogonal Function Representation for Signal	28
Section 3 Signal Discretization	36
Reference	39
Chapter 3 Random signal Representation	40
Section 1 Random Signal	40
Section 2 Classical Statistical Method	42
Section 3 Modern Modeling Method for Signal	46
Reference	57
Chapter 4 Features and Representation of Nonlinear Signal	58
Section 1 Fractal and Fractal Dimension	58
Section 2 Chaotic Characteristics and its quantitative description	60
Section 3 Complexes and Complexity	65
Reference	71
Chapter 5 Electro-signal Source Model and 3D Problems in Biomedicine	72
Section 1 Dipole Model for Bio-electro-signal Source	72
Section 2 Transmission Media and Lead System	75
Section 3 1D Signal Parameter Measurement	80
Section 4 2D Signal and Their Synthesis	84
Section 5 3D Signal and Their Synthesis	86

Reference	86
Chapter 6 Correlation and Convolution	87
Section 1 Linear Correlation	87
Section 2 Circular Correlation	90
Section 3 Coherent Function and Coherent Coefficient	92
Section 4 Linear Convolution	95
Section 5 Circular Convolution	99
Section 6 Application of Correlation	102
Reference	106
Chapter 7 Wiener and Kalman Filtering	107
Section 1 Time Domain Solution of the Wiener Filter	108
Section 2 Wiener's Predictor	115
Section 3 Application of Wiener Filter	119
Section 4 Signal Model of Kalman Filtering	122
Section 5 Application Kalman Filter	124
Section 6 Application Kalman Filter	127
Reference	130
Chapter 8 Some Problems in Time Domain Digital Filtering for Biomedical Signal	131
Section 1 Noise and Interference	131
Section 2 Weighted Averaging Filtering	136
Section 3 Averaging Filtering by Period	139
Section 4 Superposing and Averaging Filtering	140
Section 5 Homomorphic Signal Filtering	144
Section 6 Adaptive Filtering	145
Reference	151
 PART B BIOMEDICAL DIGITAL SIGNAL PROCESSING IN FREQUENCY DOMAIN 	
Chapter 9 Fourier transform and frequency domain analysis	155
Section 1 Fourier Transform and its Significance	155
Section 2 Fast Fourier Transform	158
Section 3 Properties of the Fourier Transform	164
Section 4 Frequency Domain Analysis	169
Section 5 Frequency Resolution	175
Section 6 Magnitude-Squared Coherence Function	178
Section 7 Filtering in Frequency Domain	187
Reference	188
Chapter 10 Random Signal Analysis in Frequency Domain	190
Section 1 Classical Method for Estimating Power Spectrum	190
Section 2 Modern Spectral Analysis	195

Reference	196
Chapter 11 modern signal processing techniques	197
Section 1 Time Frequency Analysis	197
Section 2 Higher Order Spectral Analysis	199
Section 3 Basis of Wavelet Analysis	200
Section 4 Independent Component Analysis	209
Reference	220
PART C APPLICATIONS OF BIOMEDICAL Electro-signal from Cardiovascular System DIGITAL SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES	
Chapter 12 Processing of Biomedical Signal Digital Processing Techniques	225
Section 1 Routine Digital Processing for ECS	226
Section 2 ECS Monitoring	232
Section 3 High Frequency Electrocardiosignal Processing	235
Section 4 Exercise ECS Processing	237
Section 5 Atrial and Ventricular Late Potential Measure	239
Section 6 Atrial Fibrillation Wave Analysis	245
Section 7 Multiple Point Potential Mapping	248
Reference	250
Chapter 13 Sonic signal processing	251
Section 1 Processing Phonocardiosignal	251
Section 2 Signal Processing for Lung and Breath Sounds	253
Section 3 Signal Processing for Arthro-sound	257
Section 4 Signal Processing for Muscle sound	258
Reference	258
Chapter 14 Processing Pressure Signals	260
Section 1 Introduction	260
Section 2 Direct Measurement for BP Catheter Method	261
Section 3 Indirect Measurement for BP	262
Section 4 Dynamic Measurement for BP	266
Reference	266
Chapter 15 Impedance Signal Measurement and Analysis	267
Section 1 Primary Principles of Bio-impedance Measurement	267
Section 2 Basic Techniques of Bio-impedance Measurement	269
Section 3 Applications of Bio-Impedance Measurement	285
Reference	286
Chapter 16 Measurement and Processing of Signals from Neural and Muscular System	288
Section 1 Measurement and Processing for Eelectroencephalo-signal	288
Section 2 Electromyosignal Processing	297
Section 3 Evoked Potential Signal Processing	300

Section 4	Measuring Autonomic Nervous System Function	304
Section 5	Electrogastrointestinal Processing	318
Reference		327
Chapter 17	Signal Processing Techniques for Gene and Protein Information Processing	329
Section 1	Correlation Analysis—alignment	329
Section 2	Signal Processing in Predicting Structures and Functions of Protein	330
Section 3	Signal Processing Techniques in DNA Structure and Function Prediction	333
Section 4	Location for DNA Motifs and Enzyme Recognition Sites	337
Section 5	Genotype and Phenotype	337
Reference		341
Chinese-English Glossary		342

绪 论

生物体本身既是很好的信号发生系统,又是很好的信号处理系统。对生物体的信号发生和处理功能的模仿形成了“仿生学”。直到现在还有很多生物体的功能原理未弄清楚,仿生科学任重而道远。蝙蝠的声呐系统及人类的语言发生和处理、思维信息的处理、遗传信息的处理都具有高超的信息处理能力。例如,生物体是一个很好的带通光学滤波器,只能让 400~700nm 的波长的光线通过,并进行非线性处理。没有人类对这一段电磁波的特异感觉,就没有光学可言,可能就只有电磁波谱学。五光十色的斑斓世界,将可能什么颜色也没有。颜色就是人体对特定电磁波的感觉的描写。没有视觉就没有光学,没有听觉就没有声学。人们为了生存,对外界信号(刺激)的处理,一般都是非线性的,如进行对数压缩,也就是说,作为信号处理系统而言,人体是一个非线性系统。因此在叙述现有的各种信号处理技术之前,必须对作为信号发生的生物体系统(信号源)及其所发出的信号特征有起码的了解。这是本书首先需要完成的任务。这一点的重要性在于:没有对生物体系统(信号源)及其所发出的信号特征有起码的了解,一切信号处理方法的应用都可能是盲目的。

生物医学信号数字处理技术(不管是硬件处理还是软件处理)是现代医学诊断和治疗设备的一种核心技术。由于生物医学信号的产生系统、传输介质、信号性质都有一些独特的性质,而使之成为一门独立的应用学科。在叙述处理生物医学信号方法之前,首先对信号、信号的类型、生物医学信号的特点和生物医学信号处理的目的作一些简单介绍。

一、信号

信号是携带客观物体(如人体)的状态或特性(status or features)的载体(carrier)。这种说法叫信号的概念模型(conceptual model)。信号的数学模型(mathematical model)是一些函数,包括模拟的(即连续的, continuous)和数字的函数或方程。信号的物理模型(physical model)是包括力、声、热、电、光等各种形式的有色有声的客观存在;物质或能量(matter or energy)。生物医学信号是携带生物体(organism)的状态或特性的载体。

当前,信号处理的对象主要是各种各样的物理信号,包括力学的(mechanic)、声学的(sonic)、热学的(thermal)、电磁学的(electromagnetic)、光学的(optical)信号,这些信号还可分为一维的(unidimensional)、二维的(bidimensional)和三维的(tridimensional)信号。以计算机为工具的信号数字处理技术处理后的信号只能是数字化了的电信号,因此人体发出的各种信号除了电信号以外,都必须经过两次转换:①非电信号转为电信号;②电信号的数字化。担任第一项任务的器件(device)为换能器(transducer),如果待处理的信号已经是电信号则获得此信号的器件为传感器(sensor);完成第二项任务的器件为模数转换器(analog-digital converter, ADC)。

1. 信号的基本特征

这里按照经典的傅里叶(Fourier)观点描述信号的基本特征。傅里叶关于信号的基本