现代数字信号处理

Modern Digital Signal Processing

皇甫堪　陈建文　楼生强　编著

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
http://www.phei.com.cn

现代数字信号处理
Modern Digital Signal Processing

皇甫堪　陈建文　楼生强　编著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书全面、系统地阐述了现代数字信号处理的理论、方法及其应用。全书共分 13 章，主要内容包括：基础知识，平稳过程的线性模型，确定性最小二乘滤波器，统计性最小二乘滤波器，自适应滤波器，现代功率谱估计，离散希尔伯特变换，同态信号处理，高阶谱估计，短时傅里叶变换，小波变换，维格纳分布和多速率信号处理。每章末给出了大量的习题，并在书后附有参考文献。

本书既可作为高等学校信息与通信工程专业及相关专业高年级本科生、硕士生、博士生的教材和参考书，也可作为企、事业单位从事通信与电子系统、信号与信息处理等相关工作的广大科技工作人员的参考书和培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

现代数字信号处理/皇甫堪，陈建文，楼生强编著 . 一北京：电子工业出版社，2003. 9
ISBN 7-5053-9181-X

Ⅰ. 现… Ⅱ. ①皇…②陈…③楼… Ⅲ. 数字信号—信号处理—高等学校—教材 Ⅳ. TN911. 92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 084600 号

责任编辑：刘宪兰　　特约编辑：联霞
印　　刷：北京大中印刷厂
出版发行：电子工业出版社 http://www.phei.com.cn
　　　　　北京市海淀区万寿路 173 信箱　邮编 100036
经　　销：各地新华书店
开　　本：787×980　1/16　印张：31　字数：658 千字
版　　次：2003 年 9 月第 1 版　2003 年 9 月第 1 次印刷
印　　数：6 000 册　定价：38.00 元

前言

现代数字信号处理是一门发展十分迅速的前沿交叉性学科，在通信、导航、雷达、声呐、地震勘探及生物医学等领域都有着广泛的应用。近几十年来，在现代数字信号处理的理论、方法及其应用方面均取得了长足的发展，有关论文及专著也不断涌现，但是，能够紧跟其发展的研究生（硕士生、博士生）教材却数量甚少，难以满足该学科领域研究生教学和培养专业技术人才的需要。本书的编写旨在跟随现代数字信号处理理论和技术的发展，补充该学科领域研究生教材的不足。

全书共分 13 章，其主要内容可概括如下：

第 1 章回顾了离散随机信号的基础知识，由相关抵消的讨论引出最佳线性估计的概念，并阐明了最佳线性估计理论中的两个重要概念——新息和偏相关系数。

第 2 章介绍了平稳随机过程的三种标准线性模型：AR（自回归）模型、MA（动平均）模型和 ARMA（自回归动平均）模型，讨论了平稳过程的一般线性表示。

第 3 章和第 4 章讨论最小二乘滤波器，这种滤波器的特性完全取决于输入信号的特性。最小二乘滤波器的输入信号可以是确定性信号，也可以是统计性信号，相应的最小二乘准则也可分为确定性的最小二乘准则和统计性的最小二乘准则。第 3 章根据确定性的最小二乘准则进行确定性的最小二乘滤波器的讨论，而第 4 章讨论统计性最小二乘滤波器。

第 5 章介绍自适应滤波器的基本理论及应用，分析了两类最常用的自适应滤波器——最小均方误差（LMS）自适应滤波器和递推最小二乘（RLS）自适应滤波器，其中主要包括 LMS 自适应横向滤波器、LMS 自适应 IIR 滤波器、LMS 自适应格型滤波器、RLS 自适应横向滤波器、RLS 自适应格型滤波器和快速横向滤波（FTF）自适应滤波器。

第 6 章讨论功率谱估计，包括经典谱估计和现代谱估计两部分内容。经典谱估计主要讨论周期图法和 BT 法，而现代谱估计主要讨论参数模型（AR，MA，ARMA）法，尤以 AR 参数模型法为主要内容。

第 7 章讨论离散希尔伯特变换，介绍傅里叶变换的实部和虚部之间，以及复序列的实部和虚部之间的各种关系。

第 8 章介绍同态滤波器原理和两类常用同态滤波器（乘法同态系统和卷积同态系统）的构成及其应用，并讨论复倒谱的概念、性质、计算方法及其实际应用。

第 9 章介绍高阶矩、高阶累积量及其谱的定义，讨论高阶累积量及其谱（高阶谱）在信号处理中的应用。

第 10 章、第 11 章和第 12 章介绍三种常见的信号时频分析方法的理论及其应用，即

短时傅里叶变换(STFT)、小波变换(WT)和维格纳分布(WD)。其中,第10章讨论了连续短时傅里叶变换和序列短时傅里叶变换的定义和性质,介绍了短时傅里叶分析和综合的原理和方法;第11章介绍了连续小波变换、二进小波变换和多分辨率分析的概念、性质及其物理意义,讨论了小波的构造,并给出了小波的例子;第12章介绍了连续维格纳分布和离散信号的维格纳分布的定义、性质及其例子,分析了连续信号的维格纳分布和相应离散信号维格纳分布的关系,讨论了广义时频分布的物理含义及其和WD,伪WD,STFT,小波变换之间的联系,并讨论了交叉项的消除方法和自适应核设计的方法。

第13章主要介绍多速率信号处理的基本概念、多速率信号处理的实现及其应用,讨论了二通道滤波器组、均匀 M 通道滤波器组、调制滤波器组、线性相位滤波器组的基本概念、设计方法及其实现。

书中凝结了作者多年从事该课程研究生教学的心得,为了保证系统性及可读性,还对引用资料进行了重新整理、推导和补充。本书的特点是:内容丰富,条理清晰,对基本概念、基本理论和方法的叙述,力求深入浅出、准确,理论与应用紧密相结合。书中第2,3,4,6章由皇甫堪撰写,第1,5,7,8章由陈建文撰写,第9,10,11,12,13章由楼生强撰写。全书由皇甫堪统稿、修改、审定后定稿,由陈建文完成整理和校对工作。

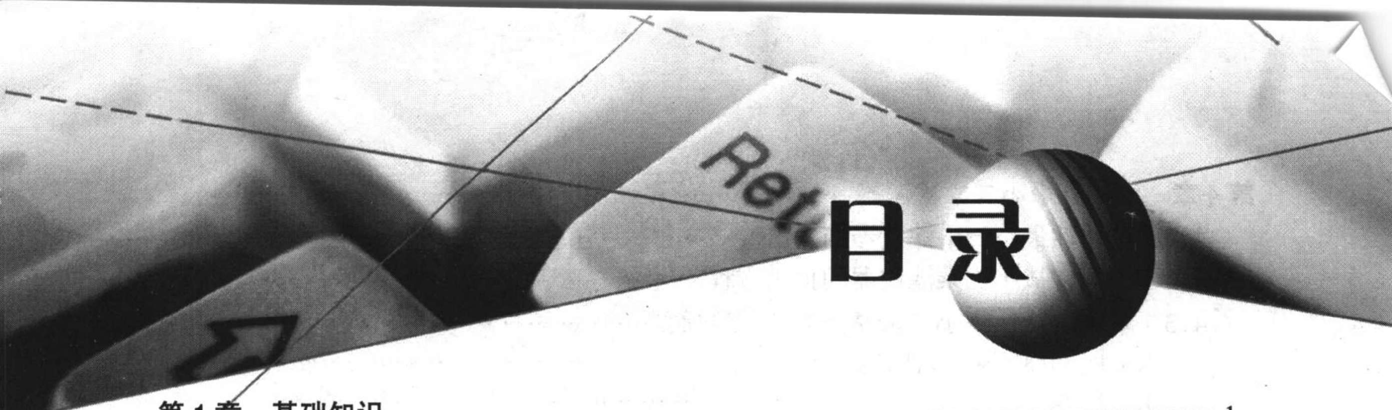
由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,敬请广大读者批评、指正。

本书得到国防科技大学研究生教材出版基金的资助,在此表示感谢。

编著者

2003年6月

于国防科学技术大学



目录

第 1 章 基础知识

随机信号需用统计方法来研究。离散随机信号的统计特性通常用概率分布函数与概率密度函数来表示或者采用统计平均量(均值、方差、相关函数与协方差函数)来描述。

本章首先复习离散随机信号(随机序列)的基本概念、统计描述及有关问题，讨论随机信号在频域中的特性，描述功率谱和周期图的概念，然后由相关抵消的讨论引出最佳线性估计的概念，并阐明最佳线性估计理论中的两个重要概念——新息和偏相关系数。

1.1 离散随机信号

1.1.1 离散随机过程

随机信号在数学上就是一个随机过程，定义为一个随机变量的序列，即 $\{x_n\} = \{x_0, x_1, x_2, \cdots, x_n, \cdots\}$，这里 n 表示时间。离散随机信号或过程是指由随机变量按一定顺序排列而成的时间序列。

一个随机变量 x_n 可用如下的概率分布函数来描述

$$P_{x_n}(X_n, n) = P[x_n \leqslant X_n] \tag{1.1.1}$$

式中 X_n 是 x_n 的一个具体值。若 x_n 取连续值，则可用概率密度函数描述为

$$P_{x_n}(X_n, n) = \frac{\partial P_{x_n}(X_n, n)}{\partial X_n} \tag{1.1.2}$$

或

$$P_{x_n}(X_n, n) = \int_{-\infty}^{X_n} p_{x_n}(x, n)\mathrm{d}x \tag{1.1.3}$$

对两个随机变量 x_n 和 x_m，则用下列联合概率分布函数来描述

$$P_{x_n, x_m}(X_n, n, X_m, m) = P[\, x_n \leqslant X_n, x_m \leqslant X_m] \tag{1.1.4}$$

若是连续随机变量，也可用联合概率密度函数

$$p_{x_n, x_m}(X_n, n, X_m, m) = \frac{\partial^2 P_{x_n, x_m}(X_n, n, X_m, m)}{\partial X_n \partial X_m} \tag{1.1.5}$$

来表示。

以此类推，对 N 个随机变量 $x_1, x_2, \cdots, x_N$，有

$$P_{x_1, x_2, \cdots, x_N}(X_1, 1, X_2, 2, \cdots, X_N, N) = P(x_1 \leqslant X_1, x_2 \leqslant X_2, \cdots, x_N \leqslant X_N) \tag{1.1.6}$$

$$p_{x_1, x_2, \cdots, x_N}(X_1, 1, X_2, 2, \cdots, X_N, N) = \frac{\partial^N P_{x_1, x_2, \cdots, x_N}(X_1, 1, X_2, 2, \cdots, X_N, N)}{\partial X_1 \partial X_2 \cdots \partial X_N} \tag{1.1.7}$$

其中，$P_{x_1, x_2, \cdots, x_N}(X_1, 1, X_2, 2, \cdots, X_N, N)$ 为 N 维概率分布函数，$p_{x_1, x_2, \cdots, x_N}(X_1,\ 1,$

X_2, 2, …, X_N, N) 为 N 维概率密度函数。

对于任何 N 个随机变量 x_1, x_2, …, x_N, 如果下列等式成立

$$P_{x_1,x_2,\cdots,x_N}(X_1,1,X_2,2,\cdots,X_N,N)=P_{x_1}(X_1,1)P_{x_2}(X_2,2)\cdots P_{x_N}(X_N,N) \tag{1.1.8}$$

则称这些随机变量是统计独立的。

如果一个离散随机过程经过时间平移 k(k 为整数) 后, 其概率统计特性保持不变, 即

$$\begin{aligned}&P_{x_{1+k},x_{2+k},\cdots,x_{N+k}}(X_{1+k},1+k,X_{2+k},2+k,\cdots,X_{N+k},N+k)=\\&P_{x_1,x_2,\cdots,x_N}(X_1,1,X_2,2,\cdots,X_N,N)\end{aligned} \tag{1.1.9}$$

则该离散随机过程称为严格平稳的。由此可以得到平稳离散随机过程的一维概率分布函数与时间无关, 即

$$P_{x_n}(X_n,n)=P_{x_n}(X_n) \tag{1.1.10}$$

而二维概率密度函数与时间差有关, 即

$$P_{x_n,x_m}(X_n,n,X_m,m)=P_{x_n,x_m}(X_n,X_m,n-m) \tag{1.1.11}$$

1.1.2　集合平均与时间平均

离散随机过程通常可用概率与统计平均量(均值、方差、相关函数、协方差函数等) 两种方法来描述。均值和方差是描述随机变量特征很有用的平均量, 因为一个随机过程是一组带有序号的随机变量, 所以可以用组成随机过程的随机变量的统计平均来描述随机过程的特征, 这类平均称为集合平均。

离散随机过程的均值定义为

$$m_{x_n}=E[x_n]=\int_{-\infty}^{+\infty}xp_{x_n}(x,n)\mathrm{d}x \tag{1.1.12}$$

其中 E 表示数学期望。均值(期望值) 通常与 n 有关。如果 $g(\cdot)$ 是一个单值函数, 则 $g(x_n)$ 就是一个随机变量, 而且随机变量的集合 $\{g(x_n)\}$ 定义了一个新的随机过程。可以证明, 该随机过程的平均为

$$E[g(x_n)]=\int_{-\infty}^{+\infty}g(x)p_{x_n}(x,n)\mathrm{d}x \tag{1.1.13}$$

如果随机变量是离散的, 则积分就变成对随机变量所有可能的值求和, 即

$$E[g(x_n)]=\sum_x g(x)p_{x_n}(x,n) \tag{1.1.14}$$

在我们对两个(或更多个) 随机过程之间的关系感兴趣的场合, 必须考虑两个随机变量的集合 $\{x_n\}$ 和 $\{y_m\}$。例如, 两个随机变量函数的期望值定义为

$$E[g(x_n,y_m)]=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}g(x,y)p_{x_n,y_m}(x,n,y,m)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{1.1.15}$$

式中 $p_{x_n,y_m}(x,n,y,m)$ 是随机变量 x_n 和 y_m 的联合概率密度。

均值有下列性质:

(1)$E[x_n+y_m]=E[x_n]+E[y_m]$，即和的均值等于均值的和;

(2)$E[ax_n]=aE[x_n]$，即一个常数与 x_n 相乘的均值等于该常数乘以 x_n 的均值。

一般说来，两个随机变量乘积的均值并不等于各自均值的乘积。如果它们相等，则称这两个随机变量是线性独立的或不相关的。这就是说，若

$$E[x_ny_m]=E[x_n]\cdot E[y_m] \tag{1.1.16}$$

则称 x_n 和 y_m 是线性独立的，其充分条件是

$$p_{x_n,y_m}(x_n,n,y_m,m)=p_{x_n}(x_n,n)\cdot p_{y_m}(y_m,m) \tag{1.1.17}$$

可以证明，它的独立性比式(1.1.16)的条件更强一些。统计独立的随机过程必定是线性独立的，而线性独立的随机过程并不意味着统计独立。

均值一般是时间的函数，但一个平稳随机过程的均值是常数，简记为 m_x，除了如式(1.1.12)定义的随机过程的均值外，还有几个平均量在信号处理的范畴内是很重要的。下面将给出它们的定义。

x_n 的均方值定义为 $|x_n|^2$ 的平均，即

$$E[|x_n|^2]=\int_{-\infty}^{+\infty}|x|^2p_{x_n}(x,n)\mathrm{d}x \tag{1.1.18}$$

均方值也就是 x_n 的平均功率。

x_n 的方差定义为$[x_n-m_{x_n}]$的均方值，即

$$\mathrm{var}[x_n]=E[|(x_n-m_{x_n})|^2]=\sigma_{x_n}^2 \tag{1.1.19}$$

因为和的均值等于均值的和，所以容易证明，式(1.1.19)可写为

$$\mathrm{var}[x_n]=E[|x_n|^2]-|m_{x_n}|^2 \tag{1.1.20}$$

通常，均方值和方差都是时间 n 的函数，但是对于平稳离散随机过程，它们均为常量。均值、均方值和方差等都是简单的统计平均量，它们只能提供有关随机过程的少量信息。相关函数与协方差函数是更有用的统计平均量。自相关函数(自相关序列)是描述随机过程在不同时刻的值与值之间的依赖性的一个量度，它定义为

$$r_x(n,m)=E[x_nx_m^*]=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}x_nx_m^*p_{x_n,x_m}(x_n,n,x_m,m)\mathrm{d}x_n\mathrm{d}x_m \tag{1.1.21}$$

式中 * 表示复共轭。

随机过程的自协方差函数(自协方差序列)定义为

$$c_x(n,m)=E[(x_n-m_{x_n})(x_m-m_{x_m})^*] \tag{1.1.22}$$

它可以写成

$$c_x(n,m)=r_x(n,m)-m_{x_n}m_{x_m}^* \tag{1.1.23}$$

对于零均值随机过程 $m_{x_n} = m_{x_m} = 0$，则

$$c_x(n,m) = r_x(n,m) \tag{1.1.24}$$

即自协方差函数与其自相关函数相同。应当注意，通常自相关和自协方差都是二维序列，即为两个变量的函数。

两个不同随机信号之间相关性的度量可以由互相关序列得出。如果$\{x_n\}$和$\{y_m\}$是两个随机过程，它们的互相关为

$$r_{xy}(n,m) = E[x_n y_m^*] = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} xy^* p_{x_n,y_m}(x,n,y,m)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{1.1.25}$$

其中 $p_{x_n,y_m}(x,n,y,m)$ 是 x_n 和 y_m 的联合概率密度。

互协方差函数定义为

$$c_{xy}(n,m) = E[(x_n - m_{x_n})(y_m - m_{y_m})^*] = r_{xy}(n,m) - m_{x_n} m_{y_m}^* \tag{1.1.26}$$

当 $m_{x_n} = m_{y_m} = 0$ 时，有

$$c_{xy}(n,m) = r_{xy}(n,m) \tag{1.1.27}$$

若对所有 m，有

$$r_{xy}(n,m) = 0 \tag{1.1.28}$$

则称它们是不相关的。统计独立的两个随机过程必然是不相关的，但不相关的两个随机过程不一定是统计独立的。

正如我们已经指出的，一个随机过程的统计特性通常是随时间变化的，但是一个平稳随机过程是用稳定条件来描述其特征，在该条件下其统计特性不随时间原点的平移而变化，这意味着一阶概率分布是与时间无关的。类似地，全部的联合概率分布函数也不随时间原点的平移而变化，即二阶联合概率分布只取决于时间差$(m-n)$。一阶平均，如均值和方差，与时间无关；二阶平均，如自相关函数，仅与时间差$(m-n)$有关。因此，对于平稳过程来说，可以得出

$$m_x = E[x_n] \tag{1.1.29}$$

$$\sigma_x^2 = E[|(x_n - m_x)|^2] \tag{1.1.30}$$

与 n 无关。若用 m 表示时间差，则

$$r_x(m) = r_x(n,n+m) = E[x_n x_{n+m}^*] \tag{1.1.31}$$

这就是说，一个平稳随机过程的自相关序列是一个一维序列，是时间差 m 的函数。

在许多场合我们会遇到在严格的意义上并不平稳的随机过程，即它们的概率分布不是时不变的，但是式(1.1.29) 至式(1.1.31) 仍然成立，这类随机过程称为是广义平稳的。

上面给出了离散随机过程的各种统计描述，现在再介绍另一种时间平均量描述。定义一个随机过程的时间平均为

$$\langle x_n \rangle = \lim_{L\to\infty}\frac{1}{2L+1}\sum_{n=-L}^{L} x_n \tag{1.1.32}$$