随机信号处理原理与实践

杨鉴 梁虹 编著

科学出版社
www.sciencep.com

随机信号处理原理与实践

杨 鉴 梁 虹 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了随机信号处理的基本理论、算法及应用。全书共8章，内容包括离散时间信号处理基础、随机信号分析基础、随机信号的线性模型、非参数谱估计、最优线性滤波器、最小二乘滤波和预测、参数谱估计、自适应滤波器。本书尽量采用大多数硕士研究生和工程技术人员熟悉的数学知识阐述基本理论，注重用例子解释基本概念，用MATLAB仿真实验帮助读者理解所学内容。各章均给出了适当的习题和上机实验题，以方便读者实践和教师教学。书中所有的MATLAB程序和实验用数据文件，读者可从科学出版社的网站下载。

本书可作为相关专业硕士研究生、高年级本科生的教材及教学参考书，也可供相关领域工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

随机信号处理原理与实践/杨鉴，梁虹编著. —北京：科学出版社，2010.6

ISBN 978-7-03-028025-1

Ⅰ.①随… Ⅱ.①杨… ②梁… Ⅲ.①随机信号-信号处理-研究生-教材 Ⅳ.①TN911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第114318号

责任编辑：匡 敏 潘斯斯 潘继敏/责任校对：宋玲玲

责任印制：张克忠/封面设计：耕者设计工作室

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

北京市文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年6月第 一 版 开本：B5(720×1000)

2010年6月第一次印刷 印张：13 1/4

印数：1—3 000 字数：260 000

定价：26.00元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前　　言

信号处理是信息科学中非常重要的一门专业基础学科。近 20 年来,信号处理学科获得了迅速发展,这段时期新发展的理论、方法和技术已成为现代信号处理的主要标志。现代信号处理已经广泛应用于通信、多媒体、自动化、地球物理、航空航天、生物医学、天文、振动工程等几乎所有的技术领域。

随机信号处理是现代信号处理的重要组成部分。国内大部分高等院校都将"随机信号处理"列为"信息与通信工程"、"控制科学与工程"、"生物医学工程"等(学术型)硕士研究生,以及"电子与通信工程"、"控制工程"等工程硕士研究生的学位课、专业基础课。目前这些信息科学类硕士研究生的招生规模一直都在扩大,从 2009 年起,我国许多高校也开始招收信息科学类的全日制工程硕士研究生。为了适应社会需求,无论是学术型硕士还是工程型硕士,乃至今后一段时期内,工科类硕士研究生的课程设置应体现工程性、实践性和应用性。

到目前为止,国内已出版多部"随机信号处理"课程的教材,有些水平还很高。但这些教材往往过分强调理论,也要求读者有较高的数学基础,对于大多数一般院校的硕士研究生,特别是工程硕士研究生,这些教材所采用的数学知识往往成为难以克服的障碍。作者多年的教学实践表明,目前还没有特别适合工程硕士研究生和一般院校硕士研究生使用的"随机信号处理"课程的教材。因此,以"工程性、实践性和应用性"为目标进行"随机信号处理"课程的教材建设是十分有意义的。为了适应教材建设的需要,作者在长年从事本科生、研究生信号处理系列课程教学和建设工作,以及这一领域的科研工作的基础上,编写了这部有一定特色的教材。

全书共分 8 章。第 1 章回顾和概述了离散时间信号处理的基本内容,这些内容是本科"数字信号处理"课程的教学内容。第 2 章回顾了离散时间随机过程的基本概念,讨论了随机信号通过线性系统和谱分解定理,还提供了估计理论的入门性介绍。第 3 章讨论了随机信号的三种线性模型,以及这三种模型间的关系。前三章内容是学习后续章节的必要基础。第 4 章讨论了平稳随机信号的自相关估计,阐述了非参数谱估计的相关图法和周期图法,最后介绍了语音信号的非参数谱估计实例。第 5 章讨论了最优线性滤波器,包括最优信号估计、线性均方估计、维纳滤波器及最优线性预测等内容。最优线性滤波理论简洁而完美,是随机信号处理的经典内容。第 6 章讨论了最小二乘滤波和预测,包括最小二乘原理、线性最小二乘估计、最小二乘 FIR 滤波器及最小二乘线性预测。最小二乘方法是一个古老的方法,在近几十年里它又成为现代信号处理的一个非常有效的方法,在现代谱估计

和自适应滤波中，它得到了广泛的应用和发展。第 7 章讨论了信号建模及基于信号建模的功率谱估计，这些内容是现代谱估计的经典内容，最后介绍了“预白化-后着色”谱估计和语音信号的线性预测分析实例。第 8 章介绍了自适应滤波器的原理，讨论了最速下降法、LMS 算法和 RLS 算法等经典的自适应滤波算法，还介绍了自适应干扰对消和自适应信道均衡的原理及仿真实验，以使读者对自适应滤波器的应用有一些体验。

本书具有以下特点：

(1) 把信号处理的基本理论、算法和应用融为一体，相辅相成。

(2) 尽量采用大多数硕士研究生和工程技术人员熟悉的数学知识阐述基本理论。

(3) 注重用例子解释基本概念，用 MATLAB 仿真实验帮助读者理解所学内容。

(4) 以工程应用为背景，介绍随机信号处理的典型应用。

为了便于读者深入理解随机信号处理的理论、算法和应用，本书有针对性地精心设计了丰富的例子，以及 MATLAB 仿真实验，并给出了实现这些实例的完整程序。各章均给出了适当的习题和上机实验题，以方便读者实践和教师教学。书中所有的 MATLAB 程序和实验用数据文件，读者可从科学出版社的网站下载，网址是：http://www.sciencep.com/eduresource/resource_download.php。

全书由杨鉴主编，第 4～8 章由杨鉴编写，第 1～3 章由梁虹编写。

信息学院同仁张榆峰教授、王静教授和普园媛教授对本书的编写提出了宝贵意见和建议，研究生王蒙、曾秀花、朱磊完成了部分初稿的录入工作，研究生和林钰、左利波仔细阅读、校对了书稿，在此一并表示衷心的感谢！同时，感谢余江教授、张学杰教授给予的大力支持和帮助！

作者以教学讲义的形式把本书的初稿数次应用于我院工程硕士“现代信号处理”课程的教学中，听过该课程的很多研究生对本书提出了宝贵的修改意见，在此表示感谢。

本书获云南省特色专业建设基金、省级精品课程建设基金的资助。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编　者

2010 年 3 月于云南大学东陆园

目　　录

第 1 章　离散时间信号处理基础

1.1　离散时间信号

在数字信号处理中，离散时间信号通常用序列来表示。序列是时间取离散值的一串样本值的集合，记为$\{x(n)\}$，n 为整型变量，$x(n)$表示序列中的第 n 个样本值。符号 $x\{\cdot\}$表示全部样本值的集合。$\{x(n)\}$可以是实数序列，也可以是复数序列。$\{x(n)\}$的复共轭序列用$\{x^*(n)\}$表示。为方便起见，也可以直接用 $x(n)$表示序列。

1.1.1　常用离散时间信号

1. 单位脉冲序列

$$\delta(n)=\begin{cases}1, & n=0\\ 0, & n\neq 0\end{cases} \tag{1.1.1}$$

序列 $\delta(n)$又称为离散冲激或单位采样序列。在离散时间系统中，它的作用类似于模拟系统中的单位冲激函数 $\delta(t)$。

2. 单位阶跃序列

$$u(n)=\begin{cases}1, & n\geqslant 0\\ 0, & n<0\end{cases} \tag{1.1.2}$$

$u(n)$类似于连续时间信号和系统中的单位阶跃信号。单位阶跃序列和单位脉冲序列的关系为

$$u(n)=\sum_{k=0}^{\infty}\delta(n-k) \tag{1.1.3}$$

$$\delta(n)=u(n)-u(n-1) \tag{1.1.4}$$

3. 矩形序列

长度为 N 的矩形序列定义为

$$R_N(n)=\begin{cases}1, & 0\leqslant n\leqslant N-1\\ 0, & n<0 \text{ 或 } n\geqslant N\end{cases} \tag{1.1.5}$$

4. 实指数序列

$$x(n) = a^n u(n) \tag{1.1.6}$$

其中,a 为不等于 0 的任意实数。

5. 正弦序列

$$x(n) = A\sin(n\omega) \tag{1.1.7}$$

其中,A 为幅度,ω 为数字域角频率,单位是弧度(rad)。

6. 复指数序列

$$x(n) = Ae^{(a+j\omega)n} = Ae^{an}[\cos(\omega n) + j\sin(\omega n)] \tag{1.1.8}$$

当 $a=0$ 时,$x(n)$的实部和虚部分别是余弦和正弦序列。复指数序列 $e^{j\omega n}$ 和连续时间复指数信号 $e^{j\Omega t}$ 一样,在信号分析中扮演着重要角色。

1.1.2 序列的基本运算

在实际应用中,需对输入系统的离散时间信号按指定的算法进行运算,从而获得有用的信息。一般来说,这些运算可以分解为若干基本运算,下面介绍的序列基本运算是研究和分析离散时间信号与系统的基础。

1. 相加

离散时间信号相加是指将两个离散序列序号相同的样本值相加,可表示为

$$z(n) = x(n) + y(n) \tag{1.1.9}$$

2. 相乘

相乘是指离散时间信号的每一个样本值乘上同一个常数,可表示为

$$y(n) = ax(n) \tag{1.1.10}$$

3. 调制

离散时间的调制是指两个离散序列序号相同的样本值相乘,可表示为

$$y(n) = s(n)x(n) \tag{1.1.11}$$

4. 移位

移位是指序列 $x(n)$平移 k 个序数,可表示为

$$y(n) = x(n-k) \tag{1.1.12}$$

当 $k>0$ 时，称序列延迟(右移)了 k 个样本；当 $k<0$ 时，称序列超前(左移)了 $|k|$ 个样本。

5. 卷积和

两个序列的卷积和(也简称为卷积)定义为

$$y(n) = h(n) * x(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)x(n-k) \tag{1.1.13}$$

6. 序列的能量

离散时间序列的能量定义为

$$E_x = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n)|^2 \tag{1.1.14}$$

如果序列的能量满足

$$E_x = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n)|^2 < \infty \tag{1.1.15}$$

则称 $x(n)$ 为平方可和序列。

此外，如果序列 $x(n)$ 满足

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n)| < \infty \tag{1.1.16}$$

则称 $x(n)$ 为绝对可和序列。

7. 实序列的奇部与偶部

对于所有的 n，如果下式成立：

$$x(n) = x(-n) \tag{1.1.17}$$

则实序列 $x(n)$ 为偶对称序列；同样，如果对于所有的 n，有

$$x(n) = -x(-n) \tag{1.1.18}$$

则实序列 $x(n)$ 为奇对称序列。任意实序列均可以分解为偶对称和奇对称序列的和，即

$$x(n) = x_e(n) + x_o(n) \tag{1.1.19}$$

其中，$x_e(n)$ 和 $x_o(n)$ 分别称为 $x(n)$ 的偶部和奇部，它们分别为

$$x_e(n) = \frac{1}{2}[x(n) + x(-n)] \tag{1.1.20}$$

$$x_o(n) = \frac{1}{2}[x(n) - x(-n)] \tag{1.1.21}$$

8. 复序列的共轭对称部分与共轭反对称部分

对于所有的 n,如果下式成立:

$$x(n) = x^*(-n) \tag{1.1.22}$$

则称复序列 $x(n)$为共轭对称序列;同样,如果对于所有的 n,有

$$x(n) = -x^*(-n) \tag{1.1.23}$$

则称复序列 $x(n)$为共轭反对称序列。任意复序列均可分解为共轭对称序列与共轭反对称序列的和,即

$$x(n) = x_e(n) + x_o(n) \tag{1.1.24}$$

其中,$x_e(n)$和 $x_o(n)$分别为共轭对称部分与共轭反对称部分,它们分别为

$$x_e(n) = \frac{1}{2}[x(n) + x^*(-n)] \tag{1.1.25}$$

$$x_o(n) = \frac{1}{2}[x(n) - x^*(-n)] \tag{1.1.26}$$

9. 任意序列的单位脉冲序列表示

任意的一个序列 $x(n)$都可以表示成单位脉冲序列移位的加权和,即

$$x(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)\delta(n-k) \tag{1.1.27}$$

1.2　离散时间系统

离散时间系统可对一个已知的输入序列进行处理或加工,从而产生一个满足特定要求的输出序列,其输入输出关系表示为

$$y(n) = T[x(n)] \tag{1.2.1}$$

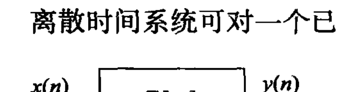

图 1.2.1　离散时间系统框图

系统框图如图 1.2.1 所示,其中 $T[\cdot]$表示系统对输入信号的某种变换或映射。

1.2.1　离散时间系统的分类

1. 线性系统

线性系统是指系统的输入和输出关系满足齐次性和叠加性。即对任意两个输

入信号 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 有

$$T[ax_1(n)+bx_2(n)] = aT[x_1(n)]+bT[x_2(n)] \tag{1.2.2}$$

其中，a、b 为任意常数。不满足上述关系的系统为非线性系统。

例 1.2.1　判断 $y(n)=T[x(n)]=2x^2(n-1)$ 是否为线性系统。

解
$$T[ax(n)]=2a^2x^2(n-1)$$
而
$$aT[x(n)]=2ax^2(n-1)$$
即
$$T[ax(n)]\neq aT[x(n)]$$

所以该系统是非线性系统。

2. 时不变系统

满足时不变特性的系统称为时不变系统。设 $x(n)$ 为系统的输入信号，对应的输出信号表示为

$$y(n) = T[x(n)] \tag{1.2.3}$$

经过移位运算得到另外一个输入信号 $x_1(n)=x(n-k)$，与之对应的系统输出信号为

$$y_1(n) = T[x_1(n)] = T[x(n-k)] \tag{1.2.4}$$

如果 $y_1(n)=y(n-k)$，则称该系统为时不变系统。同时满足线性和时不变性的系统称为线性时不变(linear time-invariant，LTI)系统。

例 1.2.2　判断 $y(n)=x(n-1)+2x(n-2)$ 是否为时不变系统。

解　$y(n)=T[x(n)]=x(n-1)+2x(n-2)$

$T[x(n-k)]=x(n-1-k)+2x(n-2-k)=y(n-k)$

所以该系统是时不变的。

3. 因果系统

因果系统是指系统在 n 时刻的输出 $y(n)$ 只取决于该时刻及该时刻以前的输入，即 $x(n)$，$x(n-1)$，$x(n-2)$，…。相反，如果系统的输出 $y(n)$ 不仅取决于现在(即 n 时刻)和过去的输入，还取决于将来的输入，如 $x(n+1)$，$x(n+2)$，…，这在时间上就违背了因果规律，因而它是非因果的。

例 1.2.3　分别判断系统(1) $y(n)=x(n)+x(n-1)$；(2) $y(n)=2x(n^2)$ 是否为因果系统。

解　系统(1)是因果系统，因为系统在 n 时刻的输出只与 n 和 $n-1$ 时刻的输入有关。

系统(2)是非因果系统，因为 $n=2$ 时刻的输出需要知道 $n=4$ 时刻的输入，即 $y(2)=2x(4)$，该输出与将来的输入有关。

4. 稳定系统

若离散系统对任意的有界输入信号，其输出也是有界的，这样的系统称为稳定系统。设 $x(n)$是系统的任意有界输入，即对所有的 n 有

$$|x(n)| \leqslant M_x \leqslant \infty \tag{1.2.5}$$

若该系统的输出 $y(n)$也有界，即

$$|y(n)| \leqslant M_y \leqslant \infty \tag{1.2.6}$$

则称该系统为稳定系统。上述稳定性的定义称为 BIBO(bounded input bounded output)稳定性。

例 1.2.4　判断系统 $y(n)=y^2(n-1)+x(n)$，$y(-1)=0$ 是否稳定。

解　设输入序列 $x(n)=a\delta(n)$，其中 a 是一常数，则系统的输出为

$$y(0)=a, y(1)=a^2, y(2)=a^4, y(3)=a^8, \cdots$$

可见，当 $1<a<\infty$时，输入信号是有界序列，而输出信号则是无界序列，所以该系统不满足 BIBO 稳定性，为不稳定系统。

1.2.2　离散 LTI 系统的响应

LTI(线性时不变)系统在系统分析与信号处理中具有非常重要的地位。本节讨论离散 LTI 系统的响应。

1. 单位脉冲响应

LTI 系统的单位脉冲响应定义为系统在零状态条件下，由单位脉冲信号 $\delta(n)$激励产生的响应，记为 $h(n)$，即

$$h(n) = T[\delta(n)] \tag{1.2.7}$$

2. 离散 LTI 系统的响应

根据LTI系统的性质，利用LTI系统的单位脉冲响应$h(n)$即可求出系统对任意输入信号$x(n)$的零状态响应。序列$x(n)$可表示为$x(n)=\sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)\delta(n-k)$，由系统的线性特性可得

$$y(n) = T[x(n)] = T\left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)\delta(n-k)\right] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)T[\delta(n-k)] \tag{1.2.8}$$

由系统的时不变特性有

$$y(n)=\sum_{k=-\infty}^{\infty}x(k)T[\delta(n-k)]=\sum_{k=-\infty}^{\infty}x(k)h(n-k)=x(n)*h(n) \tag{1.2.9}$$

式(1.2.9)表明，离散 LTI 系统对任意输入信号的响应都可表示为系统的单位脉冲响应与该输入信号的卷积和。

3. 用单位脉冲响应判定离散 LTI 系统的稳定性

由于 $h(n)$ 完全描述了离散 LTI 系统的特性，所以可用 $h(n)$ 判断系统的稳定性。离散 LTI 系统稳定的充要条件是

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty}|h(n)|<\infty \tag{1.2.10}$$

4. 用单位脉冲响应判定离散 LTI 系统的因果性

LTI 系统具有因果性的充要条件是

$$h(n)=0,\quad n<0 \tag{1.2.11}$$

为此，我们把满足条件(1.2.11)的序列称为因果序列。

5. LTI 系统的级联和并联

两个离散 LTI 系统的级联如图 1.2.2 所示。若两个子系统的单位脉冲响应分别为 $h_1(n)$ 和 $h_2(n)$，则信号通过级联系统的响应为

$$y(n)=(x(n)*h_1(n))*h_2(n) \tag{1.2.12}$$

由卷积的结合律得

$$y(n)=x(n)*(h_1(n)*h_2(n)) \tag{1.2.13}$$

所以级联系统的单位脉冲响应 $h(n)$ 为

$$h(n)=h_1(n)*h_2(n) \tag{1.2.14}$$

图 1.2.2　系统的级联

两个离散 LTI 系统的并联如图 1.2.3 所示。若两个子系统的单位脉冲响应分别为 $h_1(n)$ 和 $h_2(n)$，则该并联系统对输入 $x(n)$ 的响应为

$$y(n) = x(n) * h_1(n) + x(n) * h_2(n) \tag{1.2.15}$$

由卷积的分配律得

$$y(n) = x(n) * (h_1(n) + h_2(n)) \tag{1.2.16}$$

所以并联系统的单位脉冲响应 $h(n)$ 为

$$h(n) = h_1(n) + h_2(n) \tag{1.2.17}$$

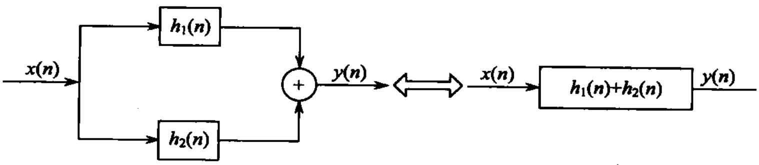

图 1.2.3 系统的并联

1.3 傅里叶变换

1.3.1 离散时间傅里叶变换

序列 $x(n)$ 的离散时间傅里叶变换(discrete time Fourier transform,DTFT)定义为

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) e^{-j\omega n} \tag{1.3.1}$$

显然,$X(e^{j\omega})$是 ω 的连续函数,并且以 2π 为周期。式(1.3.1)的级数不一定总是收敛的。例如,$x(n)$为单位阶跃序列时,级数就不收敛。若 $x(n)$绝对可和,则一般认为上述级数是收敛的。因此,有限长序列的 DTFT 总是收敛的。

通常 $X(e^{j\omega})$是一个复函数,可写为

$$X(e^{j\omega}) = X_{re}(e^{j\omega}) + jX_{im}(e^{j\omega}) \tag{1.3.2}$$

其中,$X_{re}(e^{j\omega})$和 $X_{im}(e^{j\omega})$分别是 $X(e^{j\omega})$的实部和虚部,它们都是 ω 的实函数。$X(e^{j\omega})$也可表示为

$$X(e^{j\omega}) = |X(e^{j\omega})| e^{j\varphi(\omega)} \tag{1.3.3}$$

其中,$|X(e^{j\omega})|$称为幅度函数,$\varphi(\omega)=\arg\{X(e^{j\omega})\}$称为相位函数,它们都是 ω 的实函数。傅里叶变换也称为傅里叶谱,而$|X(e^{j\omega})|$和 $\varphi(\omega)$分别称为幅度谱和相位谱。

离散时间傅里叶逆变换(IDTFT)定义为

$$x(n) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega \tag{1.3.4}$$