



新坐标大学本科电子信息类专业系列教材

随机信号分析与处理 (第2版)

罗鹏飞 张文明 编著

清华大学出版社

大学本科电子信息类专业系列

随机信号分析与处理

(第2版)

罗鹏飞 张文明 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书介绍了随机信号分析、检测与估计理论的基本原理及其应用。全书共 8 章, 主要内容包括随机变量基础、随机过程的基本概念、随机过程的线性变换、随机过程的非线性变换、窄带随机过程、马尔可夫过程和泊松过程、估计理论、检测理论。本书在内容编排上按照基本理论、应用实例、实验的形式展开, 强调对随机信号分析与处理基本概念的理解和系统方法的掌握, 注重理论和实践的结合, 特别是强调 MATLAB 在随机信号分析与处理中的应用, 书中给出了大量的例题和信号处理实例, 每章最后附有研讨题、习题、计算机作业、实验和课程设计内容, 部分习题附有答案。

本书可作为高等学校电子信息类专业本科生的教材, 也可供信号处理相关领域的工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签, 无标签者不得销售。

版权所有, 侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

随机信号分析与处理/罗鹏飞, 张文明编著. —2 版. —北京: 清华大学出版社, 2012. 3

(新坐标大学本科电子信息类专业系列教材)

ISBN 978-7-302-27917-4

I. ①随… II. ①罗… ②张… III. ①随机信号—信号分析—高等学校—教材 ②随机信号—信号处理—高等学校—教材 IV. ①TN911.6 ②TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 008999 号

责任编辑: 文 怡

封面设计: 傅瑞学

责任校对: 李建庄

责任印制: 张雪娇

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者: 三河市金元印装有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm 印 张: 18.5 字 数: 463 千字

版 次: 2006 年 6 月第 1 版 2012 年 3 月第 2 版 印 次: 2012 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 1~3000

定 价: 29.00 元

产品编号: 040652-01



编委会名单

顾问(按姓氏音节顺序):

- | | |
|-----|---------------|
| 李衍达 | 清华大学信息科学技术学院 |
| 邬贺铨 | 中国工程院 |
| 姚建铨 | 天津大学激光与光电子研究所 |

主任:

- | | |
|-----|-----------|
| 董在望 | 清华大学电子工程系 |
|-----|-----------|

编委会委员(按姓氏音节顺序):

- | | |
|-----|-------------------|
| 鲍长春 | 北京工业大学电子信息与控制工程学院 |
| 陈怡 | 东南大学高教所 |
| 戴瑜兴 | 湖南大学电气与信息工程学院 |
| 方达伟 | 中国计量学院信息工程学院 |
| 甘良才 | 武汉大学电子信息学院通信工程系 |
| 郭树旭 | 吉林大学电子科学与工程学院 |
| 胡学钢 | 合肥工业大学计算机与信息学院 |
| 金伟其 | 北京理工大学信息科技学院光电工程系 |
| 孔力 | 华中科技大学控制系 |
| 刘振安 | 中国科学技术大学自动化系 |
| 陆大绘 | 清华大学电子工程系 |
| 马建国 | 西南科技大学信息与控制工程学院 |
| 彭启琮 | 成都电子科技大学通信与信息工程学院 |
| 仇佩亮 | 浙江大学信电系 |
| 沈伯弘 | 北京大学电子学系 |

童家榕	复旦大学信息科学与技术学院微电子研究院
汪一鸣(女)	苏州大学电子信息学院
王福源	郑州大学信息工程学院
王华奎	太原理工大学信息与通信工程系
王 瑶(女)	美国纽约 Polytechnic 大学
王毓银	北京联合大学
王子华	上海大学通信学院
吴建华	南昌大学电子信息工程学院
徐金平	东南大学无线电系
阎鸿森	西安交通大学电子与信息工程学院
袁占亭	甘肃工业大学
乐光新	北京邮电大学电信工程学院
翟建设	解放军理工大学气象学院 4 系
赵圣之	山东大学信息科学与工程学院
张邦宁	解放军理工大学通信工程学院无线通信系
张宏科	北京交通大学电子信息工程学院
张 泽	内蒙古大学自动化系
郑宝玉	南京邮电学院
郑继禹	桂林电子工业学院二系
周 杰	清华大学自动化系
朱茂镒	北京信息工程学院



序言

“新坐标大学本科电子信息类专业系列教材”是清华大学出版社“新坐标高等理工教材与教学资源体系创新与服务计划”的一个重要项目。进入 21 世纪以来,信息技术和产业迅速发展,加速了技术进步的市场的拓展,对人才的需求出现了层次化和多样化的变化,这个变化必然反映到高等学校的定位和教学要求中,也必然反映到对适用教材的需求。本项目是针对这种需求,为培养层次化和多样化的电子信息类人才提供系列教材。

“新坐标大学本科电子信息类专业系列教材”面向高等学校电子信息类专业的本科教学,覆盖专业基础课和专业课,体现培养知识面宽、知识结构新、适应性强、动手能力强的人才的需要。编写的基本指导思想可概括为:

1. 教材的类型、选题和大纲的确定尽可能符合教学需要,以提高适用性。教材类型初步确定为专业基础课和专业课,专业基础课拟按电子信息大类编写,以体现宽口径;专业课包括本专业和非本专业两种,以利于兼顾专业能力的培养与扩展知识面的需要。选题首先从目前没有或虽有但不符合教学要求的教材开始,逐步扩大。

2. 重视基础知识和基础知识的提炼与更新,反映技术发展的现状和趋势,让学生既有扎实的基础,又能了解科学技术发展的现状。

3. 重视工程性内容的引入,理论和实际相结合,培养学生的工程概念和能力。工程教育是多方面的,从教材的角度,要充分利用计算机的普及和多媒体手段的发展,为学生建立工程概念、进行工程实验和设计训练提供条件。

4. 将分析和设计工具与教材内容有机结合,培养学生使用工具的能力。

5. 教材的结构上要符合学生的认识规律,由浅入深,由特殊到一般。叙述上要易读易懂,适合自学。配合教材出版多种形式的教学辅助资料,包括教师手册、学生手册、习题集和习题解答、电子课件等。

本系列教材已经陆续出版了,希望能被更多的教师和学生使用,并热忱地期望将使用中发现的问题和改进的建议告诉我们,通过作者和读者之间的互动,必然会形成一批精品教材,为我国的高等教育作出贡献。欢迎对编委会的工作提出宝贵意见。

前言

随机信号分析与处理是研究随机信号的特点及其处理方法的专业基础课程,是目标检测、估计、滤波等信号处理理论的基础,在通信、雷达、自动控制、随机振动、图像处理、气象预报、生物医学、地震信号处理等领域有着广泛的应用,随着信息技术的发展,随机信号分析与处理的理论将日益广泛和深入。

本教材是作者在多年讲授随机信号分析、信号检测与估计课程讲稿的基础上,根据新的教学大纲、结合教学工作体会和相关科研成果编写的。目的是使读者通过本课程的学习掌握随机信号分析与处理的基本理论和系统的分析方法。本教材的参考学时数是讲授与课堂研讨 50~54 学时,实验 6 学时,教材中每章都给出了研讨题,以适应研究型教学的开展,实验和课程设计可根据教学需要进行取舍。

本教材突出的特点体现在:

(1) 将随机信号分析、信号检测与估计有机地融合在一本教材中。

(2) 加强了基本概念的阐述,减少了繁琐的公式推导过程,增加了许多信号处理的实例,体现了“厚基础、重实践、理论与实践相结合”的教学原则。

(3) 引入了基于 MATLAB 的随机过程分析方法,许多例题给出了 MATLAB 程序,使抽象的理论分析更加形象化。每章都给出了一定数量的计算机作业、实验和课程设计,这是本教材加强实践性环节的具体体现。

(4) 围绕信号处理实例,在每章的最后配备了若干研讨题,便于教师开展研究型教学,引导学生开展研究,培养科学研究能力。

本教材将另行出版配套的学习指导书和实验指导书,教学课件和教材中程序可通过作者的网络课程下载或向作者本人直接索取。

本书由罗鹏飞编写了第 1~5 章、第 7~9 章,张文明编写了第 6 章并整理了全书的习题和部分实验内容。在教材编写过程中,讲师熊跃军和在读的博士生、硕士生来庆富、李刘才、李霄辉、许可、李军、罗佳、赵晶、彭岁阳参与了教材图形、实验程序的编写工作,何志华、王象、张剑在本科学习期间参与了部分实验内容设计工作,在此一并表示感谢。本教材入选了清华大学出版社“新坐标高等理工教材和教学资源

体系创新与服务计划”,教材编写过程得到了清华大学出版社的大力支持,刘彤和邹开颜两位编辑与作者进行了大量的沟通,提出了许多宝贵建议,在本教材的第二版出版过程中,又得到了编辑文怡、赵从棉的帮助,在此表示诚挚的谢意。

作者
2011-12-08



目 录

第 1 章 随机变量基础	1
1.1 概率论的基本术语	1
1.2 随机变量的定义	2
1.3 随机变量的分布函数与概率密度	4
1.4 多维随机变量及分布	8
1.4.1 二维随机变量	8
1.4.2 条件分布	9
1.4.3 多维分布	10
1.5 随机变量的数字特征	11
1.5.1 均值	11
1.5.2 方差	11
1.5.3 协方差与相关系数	12
1.5.4 矩	12
1.5.5 数字特征计算举例	13
1.6 随机变量的函数	14
1.6.1 一维随机变量函数的分布	14
1.6.2 多维随机变量函数的分布	16
1.6.3 随机变量函数的数字特征	17
1.7 多维正态随机变量	18
1.7.1 二维正态随机变量	18
1.7.2 多维正态随机变量	20
1.7.3 正态随机变量的线性变换	21
1.8 复随机变量及其统计特性	21
1.9 信号处理实例	22
1.10 MATLAB 的统计函数	24
1.10.1 概率密度和概率分布函数	25
1.10.2 用 MATLAB 求随机变量的统计特性	27
习题	28
计算机作业	31
研讨题	31

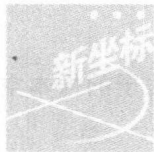
附录 A 全概率公式和贝叶斯公式	32
第 2 章 随机过程的基本概念	34
2.1 随机过程的基本概念及定义	34
2.2 随机过程的统计描述	39
2.2.1 随机过程的概率分布	39
2.2.2 随机过程的数字特征	43
2.3 平稳随机过程	48
2.3.1 平稳随机过程的定义	48
2.3.2 平稳随机过程自相关函数的特性	51
2.3.3 平稳随机过程的相关系数和相关时间	52
2.3.4 其他平稳的概念	52
2.3.5 随机过程的各态历经性	54
2.4 随机过程的联合分布和互相关函数	57
2.4.1 联合分布函数和联合概率密度	57
2.4.2 互相关函数及其性质	57
2.5 随机过程的功率谱密度	60
2.5.1 连续时间随机过程的功率谱	60
2.5.2 随机序列的功率谱	65
2.5.3 互功率谱	68
2.5.4 非平稳随机过程的功率谱	68
2.6 典型的随机过程	70
2.6.1 白噪声	70
2.6.2 正态随机过程	72
2.7 基于 MATLAB 的随机过程分析方法	74
2.7.1 随机序列的产生	74
2.7.2 随机序列的数字特征估计	77
2.7.3 概率密度估计	80
2.8 信号处理实例	81
2.8.1 脉冲幅度调制信号的功率谱	81
2.8.2 数字图像的直方图均衡	84
习题	87
计算机作业	91
研讨题	92
实验	93
实验 2.1 随机过程的模拟与特征估计	93
实验 2.2 数字图像直方图均衡	93

第 3 章 随机过程的线性变换	94
3.1 变换的基本概念和基本定理	94
3.1.1 变换的基本概念	94
3.1.2 线性变换的基本定理	95
3.2 随机过程通过线性系统分析	97
3.2.1 冲激响应法	98
3.2.2 频谱法	100
3.2.3 平稳性的讨论	101
3.3 限带过程	103
3.3.1 低通过程	103
3.3.2 带通过程	104
3.3.3 噪声等效通能带	105
3.4 随机序列通过离散线性系统分析	107
3.5 最佳线性滤波器	111
3.5.1 输出信噪比最大的最佳线性滤波器	111
3.5.2 匹配滤波器	112
3.5.3 广义匹配滤波器	115
3.6 线性系统输出端随机过程的概率分布	117
3.6.1 正态随机过程通过线性系统	117
3.6.2 随机过程的正态化	118
3.7 信号处理实例：有色高斯随机过程的模拟	119
3.7.1 频域法	119
3.7.2 时域滤波法	120
习题	121
计算机作业	126
研讨题	126
实验	127
实验 3.1 典型时间序列模型分析	127
实验 3.2 随机过程通过线性系统分析	128
第 4 章 随机过程的非线性变换	129
4.1 非线性变换的直接分析法	129
4.1.1 概率密度	130
4.1.2 均值和自相关函数	130
4.2 非线性系统分析的变换法	133
4.2.1 变换法的基本公式	133
4.2.2 Price 定理	134

4.3	非线性系统分析的级数展开法	137
4.4	信号处理实例: 量化噪声分析	138
	习题	140
	研讨题	142
第5章	窄带随机过程	143
5.1	希尔伯特变换	143
5.1.1	希尔伯特变换的定义	143
5.1.2	希尔伯特变换的性质	144
5.2	信号的复信号表示	146
5.2.1	确知信号的复信号表示	146
5.2.2	随机信号的复信号表示	147
5.3	窄带随机过程的统计特性	148
5.3.1	窄带随机过程的准正弦振荡表示	148
5.3.2	窄带随机过程的统计特性	149
5.4	窄带正态随机过程包络和相位的分布	152
5.4.1	窄带正态噪声的包络和相位的分布	152
5.4.2	窄带正态噪声加正弦信号的包络和相位的分布	155
5.4.3	窄带正态过程包络平方的分布	157
5.5	信号处理实例——通信系统的抗噪性能分析	158
5.5.1	几种常见的调制解调技术	158
5.5.2	解调系统的抗噪性能分析	161
	习题	167
	计算机作业	169
	研讨题	169
	实验	170
	实验 5.1 窄带高斯随机过程的产生	170
	实验 5.2 语音信号通过非线性系统分析(课程设计)	170
第6章	马尔可夫过程与泊松过程	172
6.1	马尔可夫链	172
6.1.1	马尔可夫链的定义	172
6.1.2	马尔可夫链的转移概率及矩阵	173
6.1.3	切普曼-柯尔莫哥洛夫方程	174
6.1.4	齐次马尔可夫链	174
6.1.5	平稳链	175
6.1.6	马尔可夫链中状态分类	178
6.1.7	遍历性	183

6.2	隐马尔可夫模型(HMM)	184
6.3	马尔可夫过程	186
6.3.1	一般概念	186
6.3.2	切普曼-柯尔莫哥洛夫方程	188
6.4	独立增量过程	188
6.4.1	独立增量过程定义	188
6.4.2	泊松过程	189
6.4.3	维纳过程	193
	习题	194
	计算机作业	198
	实验	198
	通信信道误码率分析	198
第7章	估计理论	199
7.1	估计的基本概念	199
7.2	贝叶斯估计	201
7.2.1	最小均方估计	202
7.2.2	条件中位数估计	202
7.2.3	最大后验概率估计	202
7.3	最大似然估计	205
7.4	估计量的性能	208
7.4.1	性能指标	208
7.4.2	无偏估计量的性能边界	211
7.5	线性最小均方估计	214
7.6	最小二乘估计	218
7.6.1	估计原理	218
7.6.2	估计性能	219
7.7	波形估计	220
7.7.1	波形估计的一般概念	220
7.7.2	维纳滤波器	221
7.8	信号处理实例	223
7.8.1	距离估计	223
7.8.2	目标跟踪	225
	习题	228
	计算机作业	232
	研讨题	233
	实验	233
	维纳滤波实验——噪声中语音信号的恢复	233

第 8 章 检测理论	235
8.1 假设检验的基本概念	235
8.2 判决准则	238
8.2.1 贝叶斯准则	239
8.2.2 极大极小准则	242
8.2.3 纽曼-皮尔逊准则	245
8.3 检测性能及其蒙特卡罗仿真	247
8.3.1 接收机工作特性	247
8.3.2 检测性能的蒙特卡罗仿真	248
8.4 复合假设检验	250
8.4.1 贝叶斯方法	250
8.4.2 一致最大势检验	251
8.4.3 广义似然比检验	253
8.5 多元假设检验	255
8.6 噪声中信号的检测	257
8.6.1 高斯白噪声中确定性信号的检测	257
8.6.2 最佳接收机的性能	259
8.7 信号处理实例	262
8.7.1 加性高斯信道中基带数字传输	262
8.7.2 双门限检测器	264
8.7.3 模式识别(分类)	266
习题	267
计算机作业	271
研讨题	271
实验	272
实验 8.1 检测性能的蒙特卡罗仿真	272
实验 8.2 图像模式识别	273
部分习题参考答案	274
参考文献	281



随机变量基础

概率论与随机变量是随机信号分析与处理的理论基础,本章简要介绍随机变量的基本理论,更为详细的内容请大家参考有关教材。

1.1 概率论的基本术语

1. 随机试验

满足下列 3 个条件的试验称为随机试验:

- (1) 在相同条件下可重复进行;
- (2) 试验的结果不止一个,所有可能的结果能事先明确;
- (3) 每次试验前不能确定会出现哪一个结果。

随机试验通常用 E 表示,比如投掷硬币,就是一个随机试验,它满足以上 3 个条件。首先,投掷硬币是可以重复进行的;其次试验的结果可能是正面,也可能是反面,即有两种可能的结果,而且只有这两种结果,事先可以明确,但具体到某次试验,试验前是不能预知出现哪种结果的。

2. 随机事件

在随机试验中,对试验中可能出现也可能不出现、而在大量重复试验中却具有某种规律性的事情,称为随机事件,简称为事件,如投掷硬币出现正面就是一个随机事件。

3. 基本事件

随机试验中最简单的随机事件称为基本事件,如投掷骰子出现 1, 2, \dots , 6 点是基本事件,出现偶数点是随机事件,但不是基本事件。

4. 样本空间

随机试验 E 的所有基本事件组成的集合称为样本空间, 记为 S , 如投掷骰子的样本空间为 $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

5. 频数和频率

在相同条件下的 n 次重复试验中, 事件 A 发生的次数 n_A 称为事件 A 的频数, 比值 $\frac{n_A}{n}$ 称为事件 A 发生的频率。频率反映了事件 A 发生的频繁程度, 若事件 A 发生的可能性大, 那么相应的频率也大, 反之则较小。

6. 概率

概率是事件发生的可能性大小的度量。事件的频率可以刻画事件发生的可能性大小, 但是频率具有随机波动性, 对于相同的试验次数 n , 事件 A 发生的频率可能不同, n 越小, 这种波动越大, n 越大, 波动越小, 当 n 趋于无穷时, 频率趋于一个稳定的值, 可以把这个稳定的值定义为事件 A 发生的概率, 记为 $P(A)$, 即

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_A}{n} \quad (1.1.1)$$

这一定义称为概率的统计定义。概率的统计定义不仅提供了事件 A 发生的可能性大小的度量方法, 而且还提供了估计概率的方法, 只要重复试验的次数 n 足够大, 就可以用下式来估计概率:

$$\hat{P}(A) = \frac{n_A}{n} \quad (1.1.2)$$

概率还有多种定义方式, 如古典概型的古典定义, 几何概型的几何定义, 以及更一般的概率的公理化定义, 这些定义大家可以参阅概率论的有关书籍。

1.2 随机变量的定义

在随机试验中, 试验的结果不止一个, 如投掷骰子可能出现的点数, 打靶命中的环数及一批产品中的次品数等。另一些随机试验尽管其可能结果与数值间没有直接的联系, 如投掷硬币出现正面或反面、雷达探测发现“有目标”或“无目标”等, 但可以规定一些数值来表示试验的可能结果。如对于投掷硬币, 用“1”表示“正面”, “0”表示“反面”, 对雷达探测用“1”表示“有目标”, “0”表示“无目标”。为了表示这些试验的结果, 我们定义一个变量, 变量的取值反映试验的各种可能结果, 由于试验前无法确知试验结果, 所以变量的值在试验前是无法确知的, 即变量的值具有随机性, 称这个变量为随机变量。下面给出详细的定义。

定义 设随机试验 E 的样本空间为 $S = \{e\}$, 如果对于每一个 $e \in S$, 有一个实数 $X(e)$ 与之对应, 这样就得到一个定义在 S 上的单值函数 $X(e)$, 称 $X(e)$ 为随机变量, 简记为 X 。

以上的定义可以看出,随机变量是定义在样本空间 S 上的一个单值函数。对应于不同的样本 e , $X(e)$ 的取值不同, $X(e)$ 的随机性在样本 e 中体现出来,因为在试验前究竟出现哪个样本事先无法确知,只有试验后才知道。随机变量也可用图 1.1 进行解释。对于样本空间的每一个元素 e_i ,都在实轴上有一个点 $X(e_i)$ 与之对应,由所有元素 e 所对应的实轴上的所有点 $X(e)$ 构成了随机变量,即随机变量可以看作从样本空间到实轴的映射。

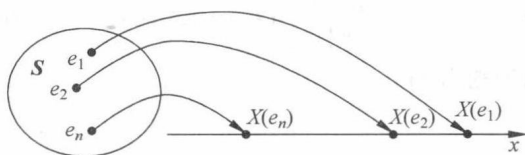


图 1.1 随机变量看作为从样本空间到实轴的映射

X 的取值可以是连续的,也可以是离散的,所以,根据 X 取值的不同可以分为连续型随机变量和离散型随机变量。

所谓离散型随机变量是指它的全部可能取值为有限个或可列无穷个。离散型随机变量的概率特性通常用概率分布律来描述。

设离散型随机变量 X 的所有可能取值为 $x_k (k=1, 2, \dots, n)$, 其概率为

$$P(X = x_k) = p_k \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (1.2.1)$$

称上式为 X 的概率分布或分布律。通常如表 1.1 所示。

表 1.1 X 的概率分布

X	x_1	x_2	...	x_n
p_k	p_1	p_2	...	p_n

其中

$$\sum_{k=1}^n p_k = 1 \quad (1.2.2)$$

下面介绍几种典型的离散随机变量的概率分布。

1. (0, 1) 分布

设随机变量 X 的可能取值为 0 和 1 两个值,其概率分布为

$$P(X = 1) = p, \quad P(X = 0) = 1 - p \quad (0 < p < 1) \quad (1.2.3)$$

称 X 服从(0, 1)分布。如投掷硬币的试验,假定出现正面用 1 表示,出现反面用 0 表示,用 X 表示试验结果,那么 X 的可能取值为 0、1, X 是一个离散型随机变量,且服从(0, 1)分布

$$P(X = 1) = P(X = 0) = 0.5$$

2. 二项式分布

设随机试验 E 只有两种可能的结果 A 及 \bar{A} , 且 $P(A) = p, P(\bar{A}) = 1 - p = q$, 将 E 独立地重复 n 次, 这样的试验称为贝努里(Bernoulli)试验, 那么在 n 次试验中事件 A 发生 m