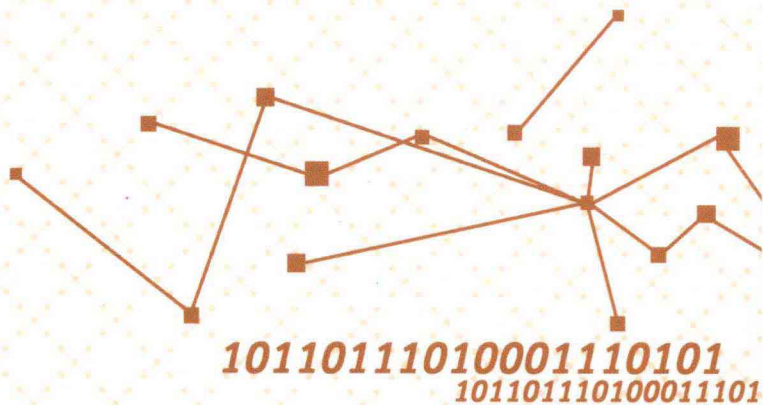


“十五”普通高等教育“十一五”国家级规划教材



中国科学技术大学 精品教材

“十二五”国家重点图书出版规划项目 | 普通高等教育精品教材



叶中付 / 编著

# 统计信号处理

Statistical Signal Processing 第2版

中国科学技术大学出版社



## 内 容 简 介

本书论述对随机信号的统计分析与管理,除了重点介绍统计信号处理的基本理论和方法外,还对所需预备知识作了概述并把阵列信号处理作为应用加以介绍.全书共分7章,依次为统计信号处理中的基本数学知识、随机信号与系统、噪声中的信号检测、非参量检测与稳健检测、信号估计理论、最佳线性滤波基本理论——波形估计和阵列信号处理.

本书是为信息科学技术领域高年级本科生和研究生的学习需求而编写的,也可供从事科研和技术开发的人员参考.

### 图书在版编目(CIP)数据

统计信号处理/叶中付编著.—2版.—合肥:中国科学技术大学出版社,2013.7

(中国科学技术大学精品教材)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

普通高等教育精品教材

ISBN 978-7-312-03237-0

I. 统… II. 叶… III. 统计信号—信号处理—高等学校—教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 140276 号

中国科学技术大学出版社出版发行

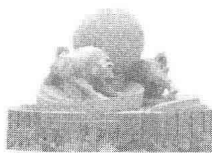
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

<http://press.ustc.edu.cn>

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:710×960 1/16 印张:26.5 插页:2 字数:505 千  
2009 年 1 月第 1 版 2013 年 7 月第 2 版 2013 年 7 月第 2 次印刷  
印数:3001—6000 册  
定价:47.00 元



## 编审委员会

主任 侯建国

副主任 窦贤康 陈初升  
张淑林 朱长飞

委员 (按姓氏笔画排序)

方兆本	史济怀	古继宝	伍小平
刘 斌	刘万东	朱长飞	孙立广
汤书昆	向守平	李曙光	苏 淳
陆夕云	杨金龙	张淑林	陈发来
陈华平	陈初升	陈国良	陈晓非
周学海	胡化凯	胡友秋	俞书勤
侯建国	施蕴渝	郭光灿	郭庆祥
奚宏生	钱逸泰	徐善驾	盛六四
龚兴龙	程福臻	蒋 一	窦贤康
褚家如	滕脉坤	霍剑青	

## 总 序

2008年,为庆祝中国科学技术大学建校五十周年,反映建校以来的办学理念 and 特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下,共组织选题281种,经过多轮、严格的评审,最后确定50种入选精品教材系列。

五十周年校庆精品教材系列于2008年9月纪念建校五十周年之际陆续出版,共出书50种,在学生、教师、校友以及高校同行中引起了很好的反响,并整体进入国家新闻出版总署的“十一五”国家重点图书出版规划。为继续鼓励教师积极开展教学研究与教学建设,结合自己的教学与科研积累编写高水平的教材,学校决定,将精品教材出版作为常规工作,以《中国科学技术大学精品教材》系列的形式长期出版,并设立专项基金给予支持。国家新闻出版总署也将该精品教材系列继续列入“十二五”国家重点图书出版规划。

1958年学校成立之时,教员大部分来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统。同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入教学中。虽然现在外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才。

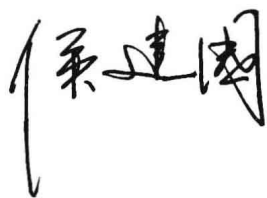
学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养

了一届又一届优秀学生。入选精品教材系列的绝大部分是基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他们在带回先进科学技术的同时,也把西方先进的教育理念、教学方法、教学内容等带回到中国科学技术大学,并以极大的热情进行教学实践,使“科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合”的方针得到进一步深化,取得了非常好的效果,培养的学生得到全社会的认可。这些教学改革影响深远,直到今天仍然受到学生的欢迎,并辐射到其他高校。在入选的精品教材中,这种理念与尝试也都有充分的体现。

中国科学技术大学自建校以来就形成的又一传统是根据学生的特点,用创新的精神编写教材。进入我校学习的都是基础扎实、学业优秀、求知欲强、勇于探索和追求的学生,针对他们的具体情况编写教材,才能更加有利于培养他们的创新精神。教师们坚持教学与科研的结合,根据自己的科研体会,借鉴目前国外相关专业有关课程的经验,注意理论与实际应用的结合,基础知识与最新发展的结合,课堂教学与课外实践的结合,精心组织材料、认真编写教材,使学生在掌握扎实的理论基础的同时,了解最新的研究方法,掌握实际应用的技术。

入选的这些精品教材,既是教学一线教师长期教学积累的成果,也是学校教学传统的体现,反映了中国科学技术大学的教学理念、教学特色和教学改革成果。希望该精品教材系列的出版,能对我们继续探索科教紧密结合培养尖创新人才,进一步提高教育教学质量有所帮助,为高等教育事业作出我们的贡献。



中国科学技术大学校长  
中国科学院院士  
第三世界科学院院士

## 再 版 前 言

本教材自 2009 年出版至今已四年有余,先后被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材、“十一五”国家重点图书、中国科学技术大学精品教材.作为衔接本科生和研究生教学的一本教材,在教学实践过程中,广大师生给予了良好评价并提出了宝贵意见和建议.为适应学科发展的需要,使该教材更加完善,对第 1 版内容作了部分修订:

1. 章节标题统一用中文表示;
2. 增加了正文中出现的重要术语的英文表述;
3. 修订了部分数学符号表示,使其更加规范;
4. 第 4 章和 6.9 节改动较大,内容更加充实严谨;
5. 第 2 章、第 4 章、第 6 章增加了计算机作业;
6. 修订了部分插图,使其更加直观明了;
7. 修订了部分文字表述,使其更加通顺.

在本书的修订过程中,采纳了读者的意见和建议,得到了信号统计处理研究室师生的帮助.徐旭讲师提出了很好的修改意见,胡南、曹圣红、鲍光照、黄磊、官灿、张博、隗雪梅等研究生积极参与了本次修订工作.在本书修订过程中,还得到了家人的大力支持.在此,作者向所有支持、关心、帮助本书出版的同志表示衷心的感谢.

由于作者水平有限,本书中难免存在一些不足之处,敬请读者批评指正.

叶中付  
2013 年 4 月

# 前 言

无论是在人类社会还是在自然界里,信息无处不在、无时不在.信号既是表现信息的形式,也是人类理解信息的桥梁.而获取信息是通过对信号的分析 and 处理来实现的,因此信号分析与处理十分重要,它已经成为一个专门的研究领域,理论和技术成果应用非常广泛.

对确定信号的分析与处理已在其他课程中介绍,本书则是论述对随机信号的分析与处理.由于对随机信号的分析与处理需要大量的统计理论,因此通常将对随机信号的分析与处理称为统计信号处理.

随机信号是普遍存在和千变万化的,对它的分析与处理的研究也是无穷无尽的.世界上许多大学、研究所和企业集中了一大批科研工作者和工程技术人员,他们把毕生的精力投入到统计信号处理理论和技术的研究、产品研发中去,极大地提高了人类的生活质量,增强了人类的认知能力,推动了社会的发展.读者只需稍加留心就会注意到国内外有大量的学术刊物、学术会议涉及统计信号处理.统计信号处理不但为通信、雷达、声呐、自动控制等领域提供理论基础和技术支持,而且还是天文学、地震学、气象学、生物物理学、医学、经济学研究与应用中的重要工具.

统计信号处理是在发展通信、雷达、声呐、自动控制等系统的过程中逐渐形成和发展起来的.对于这些系统的性能要求概括起来有两方面:一是系统能高效率地传输信息;二是可靠地传输信息.影响系统可靠性的原因主要有:系统内部存在的噪声,系统外部存在的干扰,传输过程中携带信息的信号的畸变.统计信号处理的基本任务就是提高系统的可靠性,主要内容包括信号与系统模型、信号检测理论、信号参量估计理论、信号波形估计理论.

本书是为高年级本科生和低年级研究生而写的,期望对他们现在的学习和将来的工作有所帮助.学习统计信号处理需要一些预备知识,包括概率论、随机过程、线性代数、信号与系统等.因此本书除了重点介绍统计信号处



理的基本理论和方法外,还对所需预备知识作了概述并把阵列信号处理作为应用加以介绍.全书共分7章,依次为统计信号处理中的基本数学知识、随机信号与系统、噪声中的信号检测、非参量检测与稳健检测、信号估计理论、最佳线性滤波基本理论——波形估计和阵列信号处理.

中国科学技术大学十分重视信号与信息处理学科的建设,在建校之初就把信号处理列入该学科的课程规划.沈凤麟先生从1980年起承担了“信号统计分析基础”课程的教学工作,具有丰富的教学经验,他先后编写了《信号统计分析基础》、《信号统计分析与处理》两本教材.作者师从沈先生,先是做他的助教,然后跟随他一起讲授部分章节.沈先生对教学工作的敬业精神令人钦佩,作者从他身上学到了许多宝贵的东西.沈先生退休后,作者承担了主讲本科生“信号统计分析基础”课程,还为研究生开设了“近代信号统计分析”课程.由于教改的需要,现已将两门课程合并为本硕贯通课程“信号统计分析”.经过十余年的教学与科研工作经验和成果的积累,作者对于统计信号处理有了一些心得体会.在所在系的热情支持下,作者策划了这本书的写作并申报了普通高等教育“十一五”国家级规划教材,获得批准.这本书还列入了“十一五”国家重点图书和中国科学技术大学建校五十周年校庆精品教材目录.

在本书的策划和撰写过程中,得到了信号统计处理研究室许多同志的帮助.徐旭讲师不仅参与了第2章内容的写作,还参与了全书问题的讨论.刘超、彭建辉、张裕峰、戴继生、秦翰钦、贾红江、崔波、薛续磊、杜冰、祝佳、朱张勤、向利、李春辉、王翀等研究生积极参与资料的收集、文字的录入和问题的讨论.在本书的策划和撰写过程中,还得到了家人的理解和大力支持.此外,本书的完成还参考了很多文献和书籍.在此作者向所有支持、关心、帮助本书的同志表示衷心的感谢.

由于作者水平有限,书中难免存在错误和不足.作者真诚希望读者批评指正,并欢迎把意见反馈至: [yezf@ustc.edu.cn](mailto:yezf@ustc.edu.cn).

叶中付

2008年10月

# 目 次

总序 .....	i
再版前言 .....	iii
前言 .....	v
第 1 章 统计信号处理中的基本数学知识 .....	1
1.1 概率论概要 .....	1
1.1.1 随机事件及其概率 .....	2
1.1.2 随机变量及其分布 .....	4
1.1.3 多维随机变量 .....	6
1.1.4 随机变量的数字特征 .....	8
1.1.5 高斯随机变量 .....	11
1.1.6 随机变量函数的分布 .....	14
1.1.7 复随机变量 .....	15
1.2 随机过程基础 .....	17
1.2.1 平稳与非平稳随机过程 .....	18
1.2.2 随机过程的统计特性与维纳-辛钦定理 .....	20
1.2.3 高斯随机过程 .....	27
1.2.4 随机过程的积分微分特性 .....	28
1.3 线性代数导论 .....	30
1.3.1 矩阵的概念和基本运算 .....	30
1.3.2 特殊矩阵 .....	33
1.3.3 矩阵的逆 .....	36
1.3.4 矩阵分解 .....	37
1.3.5 子空间 .....	41

1.3.6 梯度分析 .....	42
参考文献 .....	48
<b>第 2 章 随机信号与系统</b> .....	<b>49</b>
2.1 信号与系统概述 .....	49
2.1.1 信号及其分类 .....	49
2.1.2 系统及其分类 .....	52
2.2 随机信号通过线性时不变系统 .....	54
2.2.1 系统输出的均值 .....	55
2.2.2 系统输出的自相关函数和功率谱密度函数 .....	55
2.2.3 系统输入与输出的互相关函数和互功率谱密度函数 .....	56
2.2.4 系统输出的概率密度 .....	58
2.3 随机序列通过线性时不变系统 .....	59
2.3.1 系统输出的均值 .....	59
2.3.2 系统输出的自相关函数和功率谱密度函数 .....	60
2.3.3 系统输入与输出的互相关函数和互功率谱密度函数 .....	61
2.4 白噪声通过线性时不变系统 .....	62
2.4.1 系统输出的一般特性及等效噪声带宽 .....	63
2.4.2 白噪声通过理想低通系统 .....	64
2.4.3 白噪声通过理想带通系统 .....	65
2.4.4 白噪声通过具有高斯频率特性的带通系统 .....	66
2.5 白噪声序列和平稳随机序列的参数模型 .....	67
2.5.1 自回归滑动平均模型 .....	68
2.5.2 自回归模型 .....	69
2.5.3 滑动平均模型 .....	70
2.5.4 三种模型间的联系 .....	70
2.6 随机信号通过线性时变系统 .....	71
2.7 随机信号通过非线性系统 .....	72
2.7.1 直接算法 .....	73
2.7.2 特征函数法 .....	75
2.7.3 普赖斯定理 .....	76
2.7.4 级数展开法 .....	78
小结 .....	80

习题 .....	80
计算机作业 .....	83
参考文献 .....	84
<b>第3章 噪声中的信号检测</b> .....	<b>85</b>
3.1 引言 .....	85
3.2 信号检测模型 .....	85
3.3 统计判决准则 .....	87
3.3.1 几个基本概念 .....	87
3.3.2 最大后验概率准则 .....	89
3.3.3 最小错误概率准则 .....	90
3.3.4 贝叶斯准则 .....	92
3.3.5 极小极大准则 .....	93
3.3.6 纽曼-皮尔逊准则 .....	96
3.3.7 似然比检验 .....	98
3.4 统计判决准则的推广 .....	99
3.4.1 $M$ 元假设检验 .....	99
3.4.2 多样本假设检验 .....	102
3.4.3 序贯检测 .....	108
3.4.4 复合假设检验 .....	115
3.4.5 分集技术与多检测器检测数据融合 .....	118
3.5 高斯白噪声中已知信号的检测 .....	120
3.5.1 最佳接收机 .....	120
3.5.2 通信接收机的性能 .....	124
3.5.3 雷达系统的最佳接收机性能 .....	129
3.5.4 匹配滤波器 .....	131
3.5.5 $M$ 元通信系统 .....	136
3.5.6 已知信号的分集接收 .....	140
3.6 高斯色噪声中已知信号的检测 .....	142
3.6.1 预白化方法 .....	143
3.6.2 卡亨南-洛维展开 .....	144
3.6.3 广义匹配滤波 .....	150
3.6.4 高斯色噪声中已知信号的检测 .....	151

3.6.5 性能分析 .....	154
3.7 随机参量信号的检测 .....	156
3.7.1 随机相位信号 .....	156
3.7.2 随机相位、随机振幅信号 .....	162
3.7.3 随机相位、随机频率信号 .....	164
3.7.4 随机相位、随机到达时间信号 .....	166
3.7.5 多脉冲信号的检测 .....	167
3.7.6 拓展 .....	170
3.7.7 本征滤波器 .....	172
小结 .....	174
习题 .....	175
计算机作业 .....	186
参考文献 .....	187
<b>第 4 章 非参量检测与稳健检测</b> .....	<b>189</b>
4.1 引言 .....	189
4.2 非参量检测 .....	190
4.2.1 衡量检测器性能的指标 .....	190
4.2.2 符号检测 .....	192
4.2.3 秩检测 .....	198
4.2.4 双输入检测器 .....	205
4.2.5 自适应检测 .....	208
4.3 稳健检测 .....	212
4.3.1 稳健假设检验 .....	213
4.3.2 确定信号的有限样本稳健检测 .....	216
4.3.3 确知信号的渐近稳健检测 .....	220
小结 .....	222
习题 .....	223
计算机作业 .....	225
参考文献 .....	226
<b>第 5 章 信号估计理论</b> .....	<b>227</b>
5.1 引言 .....	227
5.2 估计准则 .....	228

5.2.1	最大后验概率估计准则	228
5.2.2	最大似然估计准则	230
5.2.3	最小均方误差估计准则	230
5.2.4	线性最小均方误差估计准则	234
5.2.5	最小平均绝对误差估计准则	237
5.2.6	贝叶斯估计准则	239
5.2.7	最小二乘估计准则	241
5.3	估计准则的推广	242
5.3.1	多参量的常用估计准则	242
5.3.2	最小最大误差熵估计准则	249
5.4	估计量评价的指标	252
5.5	克拉美-罗不等式	255
5.5.1	确定单参量估计的克拉美-罗不等式	255
5.5.2	确定矢量估计的克拉美-罗不等式	257
5.5.3	随机单参量估计的克拉美-罗不等式	259
5.5.4	随机矢量估计的克拉美-罗不等式	262
5.6	最大似然估计的应用	264
5.6.1	高斯白噪声中的信号参量估计	264
5.6.2	高斯色噪声中的信号参量估计	280
5.7	最小二乘估计的应用	283
5.7.1	线性最小二乘估计	284
5.7.2	非线性最小二乘估计	285
5.8	稳健估计	287
5.8.1	稳健估计	287
5.8.2	$M$ 估计	287
	小结	292
	习题	293
	计算机作业	296
	参考文献	297
<b>第 6 章 最佳线性滤波基本理论——波形估计</b>		299
6.1	引言	299
6.2	波形估计的分类	299

6.3 连续信号的维纳滤波 .....	302
6.3.1 广义平稳随机信号的维纳滤波原理 .....	302
6.3.2 物理不可实现维纳滤波器的解 .....	303
6.3.3 物理可实现维纳滤波器的解 .....	307
6.3.4 最小均方误差 .....	313
6.3.5 非平稳随机信号的维纳滤波 .....	315
6.4 离散维纳滤波 .....	316
6.4.1 随机序列的维纳滤波原理 .....	316
6.4.2 广义平稳随机序列的物理不可实现维纳滤波器 .....	316
6.4.3 广义平稳随机序列的物理可实现维纳滤波器 .....	318
6.4.4 有限长度广义平稳随机序列的维纳滤波器 .....	319
6.5 稳健维纳滤波 .....	321
6.6 $\alpha$ - $\beta$ 滤波 .....	323
6.7 卡尔曼滤波 .....	326
6.7.1 状态空间模型 .....	326
6.7.2 离散时间卡尔曼滤波 .....	330
6.7.3 连续时间卡尔曼滤波 .....	336
6.8 稳健卡尔曼滤波 .....	339
6.9 扩展卡尔曼滤波 .....	340
小结 .....	345
习题 .....	345
计算机作业 .....	349
参考文献 .....	350
<b>第7章 阵列信号处理</b> .....	<b>351</b>
7.1 引言 .....	351
7.2 阵列信号模型 .....	351
7.2.1 信号 .....	351
7.2.2 阵列信号模型 .....	352
7.2.3 空间采样与时间采样 .....	354
7.3 波束形成 .....	355
7.3.1 阵列方向图 .....	355
7.3.2 相控阵方向图 .....	358

7.3.3	切比雪夫加权方向图 .....	360
7.3.4	数字波束形成器的优势 .....	364
7.4	自适应数字波束形成器 .....	365
7.4.1	基于最大输出信噪比准则的自适应数字波束形成器 .....	366
7.4.2	基于最小均方误差准则的自适应数字波束形成器 .....	372
7.4.3	基于极大似然比准则的自适应数字波束形成器 .....	373
7.4.4	基于最小噪声方差准则的自适应数字波束形成器 .....	374
7.4.5	各种最优准则的权矢量的关系 .....	374
7.4.6	色噪声环境下的自适应波束形成 .....	375
7.5	自适应算法 .....	377
7.5.1	最小均方算法 .....	377
7.5.2	递归最小二乘算法 .....	378
7.5.3	采样矩阵求逆算法 .....	379
7.5.4	自适应算法总结 .....	381
7.6	不相关源的测向 .....	382
7.6.1	波束形成器测向方法 .....	382
7.6.2	Capon 最小功率估计器测向方法 .....	383
7.6.3	最大似然估计方法 .....	384
7.6.4	多重信号分类方法 .....	386
7.6.5	旋转不变量信号参数估计方法 .....	388
7.6.6	信号子空间特征矢量生成广义特征值方法 .....	390
7.6.7	测向方法比较 .....	392
7.7	相干信号源测向 .....	393
7.7.1	相干信号源模型 .....	393
7.7.2	空间平滑方法 .....	395
7.7.3	信号特征矢量法 .....	399
7.7.4	基于信号特征矢量的通用差分方法 .....	400
7.7.5	几种处理相干信号源方法的比较 .....	402
	小结 .....	404
	习题 .....	405
	计算机作业 .....	407
	参考文献 .....	408



# 第 1 章 统计信号处理中的 基本数学知识

在信号的分析与处理中常常需要用到不少数学基础知识,因此在本章中将对统计信号处理中可能用到的数学知识作简单的介绍.1.1 节主要是对概率论内容的概述;1.2 节主要介绍随机过程的基本内容;在 1.3 节中,线性代数的知识将是我们阐述的重点.需要特别说明的是:由于本书侧重于数学知识在统计信号处理中的应用,因此关于数学基础知识的阐述以基本概念和有用的结论为主,而命题的严格证明较少涉及,对此感兴趣的读者可以参阅有关参考文献.

## 1.1 概率论概要

自然界与人类社会的众多现象大致可分为两类,分别称为确定性现象与随机现象.

所谓确定性现象,即在一定条件下必然会出现某一结果(或发生某一事件)的现象.例如,纯净水在一个大气压下加热至 100 摄氏度时,必然沸腾;物体以 10 米/秒的速度做匀速直线运动 1 分钟,其走过的路程必为 600 米.这类确定性现象由确定的规律所控制,从数量的角度来研究,从而产生了量与量之间确定的函数关系.

所谓随机现象,即在一定条件下可能出现不同结果(或发生不同事件),且不能准确预言究竟出现哪一种结果的现象.例如,相同条件下掷一枚硬币,可能正面向上,也可能反面向上,且在未掷之前无法准确预言究竟哪一面向上;二元数字通信系统发送的信号可能是“1”,也可能是“0”,接收机在接收之前无法准确预言接收