

信号检测 与估计理论

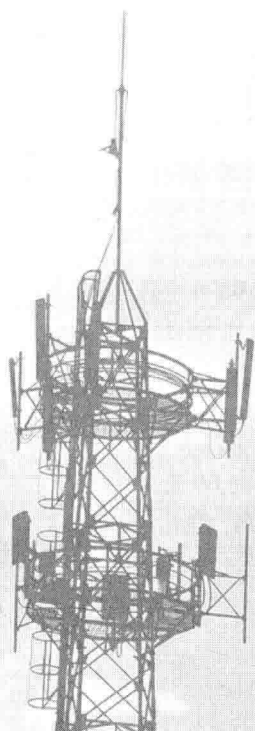
甘俊英 孙进平 余义斌/著



 科学出版社

信号检测 与估计理论

甘俊英 孙进平 余义斌/著



科学出版社
北京

内 容 简 介

信号检测与估计理论是指信号处理的统计理论,它的基本任务是检测信号的存在和估计信号的参量。本书系统阐述了信号检测与估计理论及其应用,主要内容包括随机信号基础、检测理论基础、信号波形的检测、估计理论基础、信号波形的估计及其应用等。

本书适合信息与通信工程等专业及相关专业的高校师生阅读,也适合通信、雷达、图像处理、模式识别、自动控制、系统辨识、导航、遥控遥测、声呐、地质勘探等领域的科研和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

信号检测与估计理论 / 甘俊英, 孙进平, 余义斌著. —北京: 科学出版社, 2016.3

ISBN 978-7-03-047791-0

I. ①信… II. ①甘… ②孙… ③余… III. ①信号检测 ②参数估计 IV. ①TN911.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 055372 号

责任编辑: 郭勇斌 肖 雷 / 责任校对: 贾娜娜
责任印制: 张 倩 / 封面设计: 黄华斌

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

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

*

2016 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张: 23 1/2

字数: 474 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

信息科学是一门涉及面极广的新兴科学,其主要研究内容是信息的性质、获取、传输、检测、存储、处理、控制的基本原理和方法;而信号处理就是对实际观测信号进行加工,对有用信号进行提取和利用。随着电子技术与通信技术的发展,概率论、数理统计和信号处理理论密切结合,形成了为恢复信息而对随机性观测结果进行处理的理论——统计信号分析与处理。目前,统计信号分析与处理已成为一个重要的科学分支,应用领域不断扩大。而信号检测与估计理论即为信号处理的统计理论。它的基本任务是检测信号的存在和估计信号的参量,主要内容包括随机过程理论、信号的检测理论和估计理论及其应用等。检测与估计理论是信息与通信工程专业的研究生以及从事通信、雷达、图像处理、模式识别、自动控制、系统辨识、导航、遥控遥测、声呐、地质勘探等领域研究的教学、科研和工程技术人员必须掌握的基础知识。

从2008年8月至今,我与北京航空航天大学的孙进平教授共同探讨检测与估计理论的教学与科研。期间,深感检测与估计理论在信息与通信工程专业的重要地位及其应用领域的不断扩大,同时,也感叹当时涉及该理论与应用参考书的不足,遂萌发合作编撰《信号检测与估计理论》一书。本书结合作者多年来的教学与科研成果,较为系统地阐述了检测与估计理论及其应用,可作为信息与通信工程、控制科学与工程等专业的研究生教材或教学参考书,也可从事电子、信息、通信等领域的教学、科研和工程技术人员提供参考。

本书共分9章。第1章为绪论,第2章为随机信号基础,第3章为检测理论基础,第4章为信号波形的检测,第5章为估计理论基础,第6章为信号波形的估计,第7章为通信系统中的应用,第8章为数字图像处理中的应用,第9章为其他应用。

本书由五邑大学和北京航空航天大学的教师合作完成。第1章由五邑大学的甘俊英教授执笔;第2章与第6章由北京航空航天大学的孙进平教授执笔;第3章由五邑大学的应自炉教授执笔;第4章与第5章由五邑大学的周开利教授执笔;第7章由五邑大学的曾军英副教授执笔;第8章由五邑大学的罗兵教授执笔;第9章由五邑大学的余义斌副教授执笔。本书由甘俊英主撰并统稿,孙进平、应自炉、周开利、曾军英、罗兵、余义斌为本书的撰写做出了重要的贡献,为并列的第二作者。在本书的撰写过程中,北京航空航天大学的毛士艺教授和五邑大学的

张有为教授提出了许多宝贵意见和建议；北京航空航天大学李少洪教授与杨晨阳教授提供了较多素材；五邑大学的研究生黄聿对第2章与第6章进行了排版。此外，本书的出版得到了国家自然科学基金（No.61072127、No.61372193、No.61471019）、广东省自然科学基金（No.S2013010013311）、五邑大学专著出版基金的大力支持，在此一并深表谢意。

本书从酝酿、撰写到出版，历时七年有余，作者修改了多遍，付出了大量的心血。由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

甘俊英

2015年8月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 信号处理发展概况	1
1.3 信号检测与估计理论概述	3
1.4 内容编排	4
第 2 章 随机信号基础	6
2.1 引言	6
2.2 概率与随机变量	6
2.2.1 概率论基础	7
2.2.2 随机变量	10
2.2.3 随机变量的数字特征	14
2.2.4 常用概率分布	15
2.3 随机过程	17
2.3.1 随机过程的基本概念	18
2.3.2 平稳随机过程	22
2.3.3 各态历经(遍历)随机过程	23
2.3.4 功率谱密度	25
2.3.5 白噪声过程	28
2.3.6 随机信号通过线性系统	28
2.4 离散随机信号	30
2.4.1 随机序列的统计描述	30
2.4.2 平稳随机序列	32
2.4.3 随机信号的采样定理	34
2.4.4 时间序列信号模型	35
2.5 卡亨南-洛维展开	37
2.5.1 积分方程的推导	37
2.5.2 积分方程的性质	38
2.6 随机信号仿真	44

2.6.1	MATLAB 的统计函数	44
2.6.2	随机数与随机序列的产生	48
2.6.3	随机序列的数字特征估计	54
2.6.4	蒙特卡罗方法	57
	习题	60
第 3 章	检测理论基础	62
3.1	引言	62
3.2	经典检测理论	62
3.2.1	假设检验	62
3.2.2	优化准则	65
3.3	信号检测性能	69
3.4	判决准则	70
3.4.1	贝叶斯准则	71
3.4.2	最小平均错误概率准则	74
3.4.3	极小化极大准则	74
3.4.4	奈曼-皮尔逊准则	77
3.5	多样本检测	80
3.6	多元假设检验	83
3.6.1	多元假设检验的贝叶斯准则	83
3.6.2	多元假设检验的最小平均错误概率准则	85
3.7	复合假设检验	87
3.7.1	复合假设检验的基本概念	87
3.7.2	复合假设检验方法	88
3.8	序列检测	92
3.8.1	序列检测的基本概念	92
3.8.2	最优序列检测准则	93
3.8.3	序列检测的平均观测次数	95
3.9	非参量检测	98
3.9.1	非参量检测的基本概念	98
3.9.2	基本非参量检测器	100
3.10	鲁棒检测	103
3.10.1	混合模型描述	104
3.10.2	判决规则	105
3.10.3	最小有利分布对	106

3.10.4 信号的鲁棒检测	107
习题	110
第4章 信号波形的检测	114
4.1 引言	114
4.2 匹配滤波器理论	114
4.2.1 匹配滤波器的概念	114
4.2.2 匹配滤波器的设计	115
4.2.3 匹配滤波器的主要特性	116
4.3 高斯白噪声中确知信号的检测	117
4.3.1 简单二元信号波形的检测	117
4.3.2 一般二元信号波形的检测	126
4.3.3 多元信号波形的检测	139
4.4 高斯色噪声中确知信号的检测	144
4.4.1 正交函数展开法	144
4.4.2 白化法	146
4.4.3 广义匹配滤波器法	148
4.5 随机参量信号的检测	150
4.5.1 随机相位信号波形的检测	151
4.5.2 随机振幅与相位信号波形的检测	155
4.5.3 随机频率信号波形的检测	156
习题	158
第5章 估计理论基础	162
5.1 引言	162
5.2 信号参量估计性能	163
5.2.1 无偏性	163
5.2.2 有效性	163
5.2.3 一致性(收敛性)	163
5.2.4 充分性	164
5.2.5 克拉默-拉奥不等式	164
5.3 信号参量估计基本理论	167
5.3.1 经典估计(矩估计)	167
5.3.2 贝叶斯估计	168
5.3.3 最大后验估计	171
5.3.4 最大似然估计	173

5.3.5 极大极小估计 (Minimax Estimation)	175
5.3.6 线性均方估计	176
5.3.7 最小二乘估计	180
5.4 多参量估计基本理论	182
5.4.1 多参量估计方法	182
5.4.2 非随机多参量估计的误差边界	184
5.4.3 随机多参量估计的误差边界	186
5.5 连续波估计理论	188
5.5.1 连续波估计问题	188
5.5.2 无记忆调制系统	189
5.5.3 有记忆调制系统	195
5.5.4 均方估计误差下界	197
5.5.5 多维波形估计	200
5.6 高斯色噪声中信号参量的估计	203
5.6.1 非随机参量的估计	203
5.6.2 随机参量的估计	208
习题	209
第 6 章 信号波形的估计	212
6.1 引言	212
6.2 维纳滤波	213
6.2.1 波形最佳线性滤波	213
6.2.2 维纳-霍普夫 (Wiener-Hopf) 积分方程	214
6.2.3 维纳滤波器	216
6.3 离散系统的维纳滤波	222
6.4 标量信号的卡尔曼滤波	224
6.4.1 信号模型与观测模型	225
6.4.2 最佳线性递推滤波	226
6.4.3 最佳线性递推预测	229
6.4.4 滤波与预测的关系	231
6.5 矢量信号的卡尔曼滤波	233
6.5.1 信号模型与观测模型	233
6.5.2 最佳线性滤波和预测	235
6.5.3 一步递推预测	237
6.5.4 递推滤波	240

6.5.5 卡尔曼滤波与预测公式集	242
6.5.6 卡尔曼滤波的特点	243
6.6 卡尔曼滤波的发散问题	245
6.6.1 发散现象及其原因	245
6.6.2 克服发散的方法	247
6.7 卡尔曼滤波的推广	249
6.7.1 色噪声环境下的卡尔曼滤波	249
6.7.2 扩展卡尔曼滤波	251
6.7.3 不敏卡尔曼滤波算法	254
6.8 常增益滤波方法	256
6.8.1 α - β 滤波	256
6.8.2 α - β - γ 滤波	259
6.8.3 常增益滤波应用	260
6.9 应用示例	261
6.9.1 基于维纳滤波器的噪声抑制	261
6.9.2 简单的卡尔曼滤波示例	265
习题	270
第 7 章 通信系统中的应用	272
7.1 模拟通信	272
7.1.1 调幅	275
7.1.2 调角	278
7.2 数字通信	280
7.2.1 最佳接收机	280
7.2.2 同步技术	288
7.2.3 符号间干扰	291
7.2.4 自适应均衡	295
7.3 雷达	298
7.3.1 引言	298
7.3.2 雷达信号的检测	299
7.3.3 雷达目标的状态估计	300
习题	303
第 8 章 数字图像处理中的应用	305
8.1 图像的统计特征	305
8.1.1 图像的自相关系数	305

8.1.2 图像差值信号的统计特征	307
8.1.3 图像的变换域统计特征	308
8.2 图像的 K-L 变换与图像压缩	308
8.2.1 主分量分析法	309
8.2.2 数字图像的 K-L 变换	311
8.2.3 图像压缩	313
8.3 图像复原	316
8.3.1 图像复原问题	316
8.3.2 非约束复原	317
8.3.3 约束最小平方复原	319
8.4 边缘检测	320
8.4.1 图像边缘	320
8.4.2 梯度算子	321
8.4.3 拉普拉斯算子	322
8.4.4 坎尼 (Canny) 算子	324
8.4.5 边缘检测实例	325
习题	329
第 9 章 其他应用	330
9.1 在模式分类中的应用	330
9.1.1 统计模式分类的基本问题	330
9.1.2 密度已知的模式分类	331
9.1.3 监督学习模式识别	333
9.1.4 非监督学习模式识别	334
9.1.5 特征选择	336
9.2 在系统辨识中的应用	338
9.2.1 ARMA 模型辨识	340
9.2.2 Levinson 算法	343
9.2.3 ARMA 参数辨识	347
9.3 语音信号的线性预测编码	349
9.3.1 线性预测分析的基本原理	350
9.3.2 线性预测分析的解法	354
9.3.3 线性预测分析应用——LPC 谱估计	358
习题	360
参考文献	362

第1章 绪 论

1.1 引 言

信息科技的迅猛发展已成为世界科技变革发生和发展的驱动力量。信息科学是一门涉及面极广的新兴科学，其任务是研究信息的性质、获取、传输、检测、存储、处理、控制的基本原理和方法；而信号处理就是对实际观测信号进行加工，对有用信号进行提取和利用。信号处理技术正经历着日新月异的变化，取得了长足的发展和突破。在现代科学技术领域中，电子信息系统的應用范围极为广泛，遍及人们生活的各个领域，主要包括通信、雷达、图像处理、模式识别、自动控制、系统辨识、导航、遥控遥测、声呐、地质勘探、生物医学、振动工程和射电天文等。在诸多电子信息系统应用中，信息传输的可能性和真实性已经成为核心问题。在信息传输与处理过程中，信号必然受到各种干扰因素的影响；同时，被传输的信号本身和各种干扰往往具有随机性。随着电子技术与通信技术的发展，概率论、数理统计和信号处理理论密切结合，形成了为恢复信息而对随机性观测结果进行处理的理论——统计信号分析与处理。目前，统计信号分析与处理已成为一个重要的科学分支，它的基本任务是检测信号的存在和估计信号的参量；它的主要内容包括随机过程理论、信号的检测理论和估计理论及其应用等。因此，信号检测与估计理论就是信号处理的统计理论，所要解决的问题是信息传输系统的基本问题，具有广泛的应用性。

1.2 信号处理发展概况

统计信号分析与处理是在概率论的基础上发展起来的。概率论始于17世纪中叶，后来发展成数学的一个分支。1928年，有人从概率角度出发，提出了统一度量消息中包含信息的概念。1949年，控制论的创始人维纳（Wiener）研究了度量信息的问题，将它引入热力学第二定律。但是，就信息传输给出基本数学模型的核心人物是年仅32岁的香农（Shannon）。1948年，香农的《通信的数学理论》（*The mathematical theory of communication*）发表，这篇长达数十页的论文，是信息论正式诞生的里程碑，成为信息科学发展的起点。随着计算机科学的发展和信息化的需求，信息论学科有了很大发展，并从通信技术领域延伸到其他领域，如文字

学、语言学、心理学、经济学、生物学等。

维纳在 1949 年发表的《平稳时间序列的外推、内插和平滑及其工程应用》是一部富有创见性的著作，阐明了在平稳条件下的线性滤波理论。他的重要贡献是将统计学观点引入通信与控制理论中，从统计学角度描述了通信与控制问题的本质；并在滤波器设计中，将科学判断的过程取代了经验性甚至偶然性的过程；同时，维纳滤波理论在通信和控制等技术领域获得了广泛的应用，并在应用中得到了发展；标志线性滤波理论研究的一个重要开端。但是，维纳滤波理论存在的不足是在运用过程中必须存储全部数据，因而存储量大、运算复杂，不便于实时处理，不适于矢量与非平稳随机过程。尽管如此，维纳在滤波理论中的开拓工作是不容置疑的，他在方法论上的创见，迄今仍影响着后人。

20 世纪 40 年代，信号处理在检测与估计等方面建立了一系列基本的理论和方法，为电子信息系统的发展指明了方向。1949 年，香农发表的采样理论证明了在一定条件下，可用信号的采样序列重构带限连续信号。这一结果在理论上为数字计算机用于信号处理奠定了坚实的基础。其后，许多学者发展了香农理论，将之扩展到可用于各种积分变换的采样定理；从一维信号的采用理论扩展到多维情况；由确定性信号的采样理论扩展到可应用于广义平稳或非平稳随机信号的采样理论；从均匀间隔的采样序列扩展到非均匀间隔的采样序列等。

20 世纪 50 年代中期，随着空间技术的发展，要求对卫星等空间飞行器的运动状态（如距离、方位、速度等）进行估计和预测，以实现精确测轨和跟踪，这就需要对地面跟踪站的大量观测数据进行实时处理。为此，人们将动态系统用微分方程描述，提出了滤波新算法。1960 年，卡尔曼（Kalman）将状态变量的概念引入最小均方误差估计中，得到离散线性动态系统状态估计的递推算法，在空间技术中获得了成功的应用，并随着计算机的迅速发展广泛地应用于其他领域。这就是著名的卡尔曼滤波理论。1961 年，卡尔曼和布西（Bucy）共同完成了连续系统的递推滤波算法。卡尔曼滤波理论的一个明显特点是出现了一个非线性微分方程，即里卡蒂（Riccati）方程，易于计算机求解，适于实时处理。因此，卡尔曼滤波理论在应用上具有更广泛的可能性和更美好的前景。

第二次世界大战后，计算机、数字通信与自动化技术的飞速发展，将信息的传输、处理与存储技术推向了一个崭新的阶段，形成了研究信息形态、传输、处理与存储的信息科学。20 世纪 60 年代以来，微电子集成电路技术迅猛发展，为复杂信号的处理实现提供了可能性。现在，信号处理技术的研究不仅限于一般理论和方法的探讨，而更多地侧重于实现，新的实现方法和算法层出不穷。这些研究对信号处理理论的发展及其实际应用起到了至关重要的作用，将信号处理的发展推向高峰；同时，昭示人类社会已朝着智能信息化社会迈进。

随着科技的发展，科技工作者将面临各种不断更新、日益复杂的信号处理问

题。而这些问题的出现,又驱使科技工作者在现有信号处理方法的基础上,去探索更有效的新的信号处理理论和方法,从而推动信号处理技术的进一步发展。

1.3 信号检测与估计理论概述

统计信号分析与处理已成为一个重要的科学分支,应用领域不断扩大,而信号检测与估计理论即为信号处理的统计理论。所谓信号的检测理论,是研究在噪声干扰背景中,所关心的信号是属于哪种状态的最佳判决问题。信号的估计理论,是研究在噪声干扰背景中,通过对信号的观测,如何构造待估计参数的最佳估计量问题。信号的波形估计理论则是为了改善信号质量,研究在噪声干扰背景中感兴趣信号波形的最佳恢复问题,或离散状态下表征信号在各离散时刻状态的最佳动态估计问题。信号的波形估计理论又称为信号的调制理论。这里,并未将信号的波形估计理论与信号的估计理论截然分开,而是将信号的参量估计看作信号波形估计的特例。下面通过实例加以说明。

我们考察空间飞行目标的定位问题。为此,向目标方向发射一束电磁能,观测反射的电磁波。首先,要判断有没有目标存在,这是检测问题;其次,如果判断目标存在,可能还希望知道有关目标的某些参数,例如,它的距离或速度,这是估计问题;同时,可能还需要获得目标的运动轨迹,这是波形估计问题,又称为调制问题。如果没有任何干扰,反射波通过传输媒质也未受到畸变,则问题很容易求解。只要监测反射信号,根据信号峰值出现的时间来观测发射和反射波间的延时即可。如果没有目标,也就没有尖峰信号;如果有目标,可以估计它的距离;同时,还要对噪声干扰中飞行目标的运动轨迹进行最佳恢复,即波形估计。

如果存在干扰,解答就不那么简单。干扰可能起因于经过传输媒质时产生的畸变或测量设备的热噪声。干扰的作用掩盖了我们要监测的回波信号尖峰。没有目标时,我们可能得到一个虚假的回波尖峰;而有目标时,又可能辨别不出目标回波尖峰。无论哪种情况,由于有噪声存在,都有可能做出错误的判决。我们的任务是监测某一段时间的信号,做出关于目标是否存在的判决。这就是检测问题,它属于一般的统计判决问题。如果我们已判定目标存在,并试图根据观测到的延时来确定距离,这仍会有问题,因为干扰会使回波尖峰出现的时间位置不对。这时,我们面临根据含有噪声的观测结果来恢复信息(目标距离、波形参数)的问题,这就是前面提到的估计问题。

信号的检测与估计问题是所有统计信号处理技术的基本问题,不仅出现在定位问题中,而且出现在通信、雷达、图像处理、模式识别、自动控制、系统辨识、导航、遥控遥测、声呐、地质勘探、生物医学、振动工程和射电天文等领域。在模拟通信系统中,发送的消息经常在传输中遭到畸变。在接收端往往用观测噪声

刻画这种畸变作用。所以,接收机恢复消息的问题可以表述为在随机噪声存在的情况下,估计随机信号的问题。

数字通信系统中,通常把消息编码成二元数字序列。典型的例子是使用 1 或 0 表示这些数字,借助于发送适当选择的脉冲来传输,而传输过程中脉冲还要受到畸变。畸变效应使接收机不再能确定信源究竟发送了哪种波形。我们可以用接收机中的随机噪声来描述传输过程中的畸变。这个问题仍是一个判决问题,要求根据含有噪声的观测结果判断信源发送了对应 1 或 0 的哪个波形。

高效语音传输技术的最新研究成果,是用语音谱的某些参数来表征语音波形。将这些参数发送给接收机,接收机再根据这些参数综合出语音波形。提取这些参数的问题是一个辨识问题,实质上就是在适当选定的语音波形模型中估计参数的问题。这些参数在传输过程中也要遭到畸变,因此,接收机的任务是从含有噪声的观测结果中估计这些参数。

检测和估计问题在各种应用场合中都会出现,或是单独出现,或是同时出现。虽然表面上这两个问题好像是统计信号分析与处理的两个分支,但实际上这两个问题的结构基本是相似的,这种相似性有助于解决许多信号处理问题。本书将致力于研究检测与估计理论的基本原理及其应用。

1.4 内容编排

信号检测与估计的概念、理论和方法是随机信号统计分析与处理的理论基础。本书围绕检测与估计理论的基本概念、随机信号基础、检测理论基础、信号波形的检测、估计理论基础、信号波形的估计及其应用领域展开讨论,全书共分 9 章。下面简要介绍各章的结构和内容安排。

第 1 章为绪论,探讨了信号处理的发展概况,阐述了信号检测与估计理论及其应用。第 2 章为随机信号基础,探讨了相关统计理论的基础知识,主要包括概率与随机变量、随机过程、离散随机信号、卡亨南-洛维(Karhunen-Loeve, K-L)展开、随机信号仿真等内容,是各类信号检测和估计方法及其应用的基础。第 3 章为检测理论基础,主要讨论经典的信号统计检测理论,包括经典检测理论的基本概念、检测性能的分析、信号检测的判决准则、多样本检测、多元信号的最佳检测、含有参量的复合假设检验、序列检测、非参量检测和鲁棒检测等内容。第 4 章为信号波形的检测,主要讨论高斯白噪声中确知信号的检测、色噪声中确知信号的检测、随机参量信号的检测等内容。第 5 章为估计理论基础,详细讨论了信号参量估计的性能、白高斯噪声背景下单参量和多参量估计的各种准则、连续波估计等,简要介绍了高斯色噪声背景下的参量估计。第 6 章为信号波形的估计,主要讨论最佳线性估计理论,即维纳滤波和卡尔曼滤波理论,它们均是在线性滤波前提下,以最小均

方误差为最佳准则。其中,维纳滤波器是用线性滤波器实现对平稳随机过程的最佳线性估计;卡尔曼滤波则用递推估计的算法解决包括非平稳随机过程在内的波形的最佳线性估计问题。第7章为通信系统中的应用,研究信号检测与估计理论在最佳通信系统设计方面的应用,推导系统的最佳接收机结构,评价接收机的性能,讨论符号间的干扰问题。同时,探讨了检测与估计理论在同步技术中的应用以及一种自适应均衡的方法,简单介绍了检测与估计理论在雷达中的应用。第8章为数字图像处理中的应用,介绍了统计信号处理方法在数字图像处理中的应用,包括K-L变换及图像压缩、图像复原和边缘检测等。第9章为其他应用,主要探讨检测与估计理论在模式分类、系统辨识和语音信号处理中的应用。

第2章 随机信号基础

2.1 引言

信号检测和估计理论是统计推断理论与信号处理理论相结合而形成的应用性学科，其主要目的是从叠加干扰和噪声的随机信号中按照一定的最佳准则提取有用信息，尽量去除干扰和噪声的影响。具有随机特性的输入信号决定了检测和估计理论的基础是统计理论，所采用的方法主要是统计方法。因此，有必要对相关统计理论的基础知识进行回顾。

本章首先介绍概率、随机变量等基本概念。从信号检测和估计应用的角度考虑，对条件概率、贝叶斯公式以及概率分布等概念的充分理解是非常重要的，因为这些概念几乎贯穿于信号检测和估计理论的所有方面。其次，从信号的角度对随机过程进行讨论。对于随机信号，除了最基础的多维概率密度描述外，其他如数字特征、功率谱等描述均是基于统计平均意义上的结果，因此，它们只能给出随机信号的部分统计特征，这些统计特征通常情况下对我们的分析和处理是足够的。重要的是，由统计平均所得到的这些统计特征描述是确定函数形式，这样就便于用系统的方法对处理过程进行分析。此外，各态历经性概念的引入，使得在对随机信号实际处理时，可以用时间平均代替难以实现的集平均。这也是所用分析方法（集平均）和实际处理方法（时间平均）之间等效对应的依据。离散随机信号被视为连续随机信号的采样形式。由于数字处理技术已经成为信号处理的最重要手段，所以，有必要对离散随机信号进行单独的讨论。K-L 变换作为随机过程的最佳变换处理，具有重要的理论价值，在后续章节中也将作为一种重要的分析工具得到应用。最后，通过应用实例对随机信号的仿真实践进行了简要介绍。

本章内容是后续章节详细讨论各类信号检测和估计方法及其应用的基础。这些内容主要是信号检测和估计理论中涉及较多的一些随机信号理论基础知识。对随机信号理论的深入理解，需要进一步阅读有关的教材和专著。

2.2 概率与随机变量

概率就是对可能性的量化形式。概率的概念与我们日常生活中某件事出现的机会或者说几率密切相关。将一个事件（结果）的概率同该事件出现的相对频率