



普通高等教育“十三五”规划教材
电子信息科学与工程类专业 规划教材

信号检测与估计

◆ 曲长文 周 强 李炳荣 苏 峰 编著

Electronic Information
Science and Engineering



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划
电子信息科学与工程类专业

信号检测与估计

曲长文 周 强 李炳荣 苏 峰 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

从匹配滤波、信号检测及信号估计 3 个方面, 本书系统地讨论了信号检测与估计的基本理论。第 1 章介绍信号检测与估计理论的研究对象、研究内容及研究方法。第 2 章讨论匹配滤波器最佳准则、匹配滤波器方程、白噪声及色噪声背景下的匹配滤波器。第 3 章讨论信号检测的数学基础、基本理论及方法。第 4 章和第 5 章分别讨论高斯白噪声和高斯色噪声中信号检测的基本理论和方法。第 6 章介绍序列检测的基本原理和方法。第 7 章介绍非参量检测的基本概念和方法。第 8 章讨论信号参量估计的数学基础、基本理论及性能分析方法。第 9 章讨论高斯噪声中信号参量估计的基本理论和方法。第 10 章讨论信号波形估计的基本概念和方法, 包括维纳滤波和卡尔曼滤波的基本概念、算法推导及应用。

书中配有一定量的思考题和习题, 供读者练习。附录 B 为实验指导书, 供读者进行仿真实验。全书的思考题及习题解答、教学 ppt 和实验 MATLAB 参考程序等放在出版社的教材网站上, 供读者使用。

本书可作为高等院校电子信息类专业的研究生和高年级本科生教材或教学参考书, 也可作为相关工程技术人员的参考书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

信号检测与估计 / 曲长文等编著. —北京: 电子工业出版社, 2016.3
ISBN 978-7-121-28236-2

I. ①信… II. ①曲… III. ①信号检测—高等学校—教材②参数估计—高等学校—教材 IV. ①TN911.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 040351 号

责任编辑: 韩同平 特约编辑: 邹凤麒 王 博 段丹辉

印 刷: 北京京海印刷厂

装 订: 北京京海印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 18 字数: 576 千字

版 次: 2016 年 3 月第 1 版

印 次: 2016 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 49.90 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zits@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

信息已经成为人类社会赖以生存和发展的重要资源，信息传输已经成为人类社会对信息资源开发和利用的手段。信号作为信息的载体，在其产生和传输过程中，必然受到各种干扰因素的影响。信息传输的目的是通过信号传递信息，将有用的信息无失真、高效率地进行传输，同时还要在传输过程中将无用信息和有害信息加以有效抑制。信号检测与估计是研究信息传输系统中接收设备如何从噪声中把所需信号及其所需信息检测、恢复出来的理论，是信息传输系统的基本任务之一。

信号检测与估计是研究从噪声环境中检测出信号，并估计信号参量或信号波形的理论，是现代信息理论的一个重要分支，广泛应用于电子信息系统、自动控制、模式识别、射电天文学、气象学、地震学、生物医学工程及航空航天系统工程等领域。

信号检测与估计利用信号与噪声不同的统计特性，用数理统计的方法研究随机信号的处理，尽可能地抑制噪声，从而提取信号。信号检测与估计是随机信号的统计处理理论，与概率论、数理统计及随机信号分析（随机过程）并驾齐驱地支撑着随机现象规律的研究，它们共同构成了科技工作者研究随机现象的完整知识结构。因此，信号检测与估计是“信息与通信工程”学科的重要基础课。

信号检测与估计的基本任务和内容可以分为 3 大部分：匹配滤波、信号检测及信号估计。信号检测又可分为参量检测和非参量检测。信号估计又可分为信号参量估计和波形估计。

全书共分 10 章和 3 个附录。

第 1 章是绪论，论述了信号检测与估计理论的研究对象及应用，概述了信号检测与估计的任务及研究方法，阐述了信号检测与估计课程与其他相关课程的关系；说明了本书的内容安排，给出了信号检测与估计的学习方法建议。

第 2 章是匹配滤波的内容，重点讨论匹配滤波器的基本概念、最佳准则、单位冲激响应和传输函数，并进一步讨论白噪声背景下和色噪声背景下的匹配滤波器。

第 3 章至第 7 章构成信号检测部分，重点讨论信号检测的基本理论和方法，包括信号模型、最佳检测准则、检测系统的结构和检测性能分析等内容。第 3 章至第 6 章组成参量检测的内容，主要讨论信道噪声概率密度为已知情况下的信号检测的基本理论和方法。第 7 章是非参量检测，主要讨论信道噪声概率密度为未知情况下的信号检测。第 3 章是信号检测的基本理论，论述信号检测的数学基础，重点讨论信号检测的基本概念、最佳检测准则及分析方法。在第 3 章的基础上，第 4 章讨论高斯白噪声中信号的检测，第 5 章讨论高斯色噪声中信号的检测，第 6 章讨论序列信号的检测。

第 8 章至第 10 章构成信号估计部分，主要讨论信号参量估计和信号波形估计的基本理论和方法。第 8 章和第 9 章组成信号参量估计的内容，重点讨论信号参量估计的基本理论和方法，包括信号模型、最佳参量估计准则、估计系统的结构和估计性能分析等内容。第 8 章是信号参量估计的基本理论，论述信号参量估计的数学基础，重点讨论信号参量估计的基本概念、最佳估计准则、分析方法及估计性能的评价标准。在第 8 章的基础上，第 9 章讨论高斯噪声中信号参量估计。第 10 章是信号波形估计，主要讨论信号波形估计的概念、准则，维纳滤波和卡尔

曼滤波的基本理论和方法。

为了便于读者更好地理解和把握信号检测与估计的内容和研究方法，附录 A 归纳了本书内容编排的逻辑关系。为了方便读者更好地巩固所学信号检测与估计的基本理论和方法，附录 B 为实验指导书。为了方便读者完成习题和开展实验，附录 C 简要介绍了 Q 函数和误差函数。

在本书的编写过程中，作者参阅了大量的相关文献资料，在此向所有参考文献的作者致以诚挚的谢意。

由于作者水平有限，书中难免会出现一些疏漏和不妥之处，恳请读者给予批评和指正。

作者

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 信号检测与估计的研究对象及应用	(1)
1.2 信号检测与估计的内容及研究方法	(4)
1.3 信号检测与估计课程与其他相关课程的关系	(6)
1.4 内容编排和学习建议	(6)
本章小结	(8)
思考题	(9)
第 2 章 匹配滤波器	(10)
2.1 概述	(10)
2.2 匹配滤波器冲激响应及传输函数	(11)
2.3 白噪声背景下的匹配滤波器	(15)
2.4 色噪声背景下的匹配滤波器	(20)
本章小结	(22)
思考题	(23)
习题	(23)
第 3 章 信号检测的基本理论	(26)
3.1 信号检测的实质	(26)
3.2 信号检测的数学基础	(27)
3.2.1 贝叶斯统计	(27)
3.2.2 信号检测的思路	(30)
3.3 信号检测的基本原理	(31)
3.4 二元确知信号检测	(34)
3.4.1 贝叶斯准则下的二元确知信号检测	(34)
3.4.2 最小平均错误概率准则下的二元确知信号检测	(39)
3.4.3 最大后验概率准则下的二元确知信号检测	(40)
3.4.4 极小极大准则下的二元确知信号检测	(41)
3.4.5 奈曼-皮尔逊准则下的二元确知信号检测	(43)
3.4.6 最大似然准则下的二元确知信号检测	(44)
3.5 多元确知信号检测	(48)
3.5.1 贝叶斯准则下的多元确知信号检测	(48)
3.5.2 最大后验概率准则下的多元确知信号检测	(51)
3.5.3 最大似然准则下的多元确知信号检测	(52)
3.6 随机参量信号检测	(54)
3.6.1 贝叶斯准则下的二元随机参量信号检测	(54)
3.6.2 最大平均后验概率准则下的二元随机参量信号检测	(58)
3.6.3 极小极大准则下的二元随机参量信号检测	(59)
3.6.4 奈曼-皮尔逊准则下的二元随机参量信号检测	(60)

3.6.5	最大广义似然准则下的二元随机参量信号检测	(61)
3.6.6	多元随机参量信号检测	(64)
	本章小结	(65)
	思考题	(66)
	习题	(67)
第4章	高斯白噪声中信号的检测	(71)
4.1	高斯白噪声	(71)
4.2	高斯白噪声中二元确知信号的检测	(74)
4.2.1	带限高斯白噪声中二元确知信号的检测	(75)
4.2.2	理想高斯白噪声中二元确知信号的检测	(76)
4.2.3	通信系统的检测性能分析	(78)
4.2.4	相干雷达系统的检测性能分析	(82)
4.3	高斯白噪声中多元确知信号的检测	(84)
4.3.1	高斯白噪声中多元确知信号的一般检测方法	(84)
4.3.2	高斯白噪声中多元确知信号的正交检测方法	(86)
4.4	高斯白噪声中二元随机参量信号的检测	(90)
4.4.1	随机相位信号的检测	(90)
4.4.2	随机振幅和相位信号的检测	(99)
4.4.3	随机频率和相位信号的检测	(104)
4.4.4	随机振幅、频率和相位信号的检测	(107)
4.4.5	随机相位和到达时间信号的检测	(108)
4.4.6	随机相位、频率和到达时间信号的检测	(110)
4.5	多重信号的检测	(111)
4.5.1	多重确知信号的检测	(112)
4.5.2	多重同振幅随机相位信号的检测	(114)
4.5.3	多重不同振幅随机相位信号的检测	(117)
4.5.4	多重随机振幅和相位信号的检测	(118)
	本章小结	(120)
	思考题	(120)
	习题	(120)
第5章	高斯色噪声中信号的检测	(124)
5.1	高斯色噪声中信号检测的思路	(124)
5.2	卡亨南-洛维展开	(125)
5.3	高斯色噪声中确知信号的检测	(127)
5.4	高斯色噪声中随机相位信号的检测	(133)
5.4.1	信号及噪声的复包络	(133)
5.4.2	简单二元随机相位信号的检测	(134)
5.4.3	一般二元随机相位信号的检测	(138)
	本章小结	(140)
	思考题	(141)
	习题	(141)
第6章	序列检测	(143)

6.1 序列检测的基本原理	(143)
6.2 采用修正的奈曼-皮尔逊准则的序列检测	(144)
6.3 序列检测与固定观测次数检测的比较	(147)
本章小结	(150)
思考题	(150)
习题	(150)
第7章 非参量检测	(152)
7.1 非参量检测的基本原理	(152)
7.2 符号检测	(153)
7.3 秩检测	(155)
7.4 检测器的渐近相对效率与效验	(158)
本章小结	(160)
思考题	(160)
习题	(160)
第8章 信号参量估计的基本理论	(161)
8.1 信号参量估计的实质	(161)
8.2 信号参量估计的基本原理	(162)
8.3 信号参量贝叶斯估计	(166)
8.4 最大似然估计	(171)
8.5 估计量的性能指标	(173)
8.6 克拉美-罗不等式	(175)
8.7 线性最小均方误差估计	(183)
8.7.1 单个参量的线性最小均方误差估计	(184)
8.7.2 参量向量的线性最小均方误差估计	(186)
8.7.3 线性最小均方误差估计的性质	(186)
8.8 最小二乘估计	(187)
8.8.1 最小二乘估计准则	(187)
8.8.2 单个参量的线性最小二乘估计	(188)
8.8.3 参量向量的线性最小二乘估计	(189)
8.8.4 加权线性最小二乘估计	(190)
本章小结	(191)
思考题	(192)
习题	(192)
第9章 高斯噪声中信号参量估计	(195)
9.1 概述	(195)
9.2 高斯白噪声中信号单个参量估计	(196)
9.2.1 高斯白噪声中信号单个参量的最大似然估计	(196)
9.2.2 信号幅度的估计	(198)
9.2.3 信号相位的估计	(201)
9.2.4 信号频率的估计	(204)
9.2.5 信号时延的估计	(207)
9.3 高斯白噪声中信号多个参量估计	(210)

9.4 高斯色噪声中信号参量估计	(212)
9.4.1 非随机相位信号的参量估计	(212)
9.4.2 随机相位信号的参量估计	(215)
本章小结	(215)
思考题	(216)
习题	(216)
第 10 章 信号波形估计	(218)
10.1 信号波形估计的概念及分类	(218)
10.2 维纳滤波	(219)
10.2.1 连续随机过程的维纳滤波	(220)
10.2.2 离散随机过程的维纳滤波	(226)
10.3 卡尔曼滤波	(232)
10.3.1 向量卡尔曼滤波	(233)
10.3.2 标量卡尔曼滤波	(246)
本章小结	(250)
思考题	(251)
习题	(251)
附录 A 本书内容编排的逻辑关系	(255)
附录 B 实验指导书	(257)
附录 C Q 函数和误差函数	(276)
参考文献	(278)

第 1 章 绪 论

信号检测与估计是研究从噪声环境中检测出信号，并估计信号参量或信号波形的理论，是现代信息理论的一个重要分支，广泛应用于电子信息系统、自动控制、模式识别、射电天文学、气象学、地震学、生物医学工程及航空航天系统工程等领域。

1.1 信号检测与估计的研究对象及应用

信息已经成为人类社会赖以生存和发展的重要资源，信息传输已经成为人类社会对信息资源开发和利用的手段。信息传输是由信息传输系统通过传输载有信息的信号来完成的。信号作为信息的载体，在产生和传输过程中，受到各种噪声的影响而产生畸变，信息接收者无法直接使用，需要接收设备对所接收的信号加以处理，才能提供给信息接收者使用。接收设备对所接收的信号进行处理的基本任务是检测信号(即判定某种信号是否存在)、估计携带信息的信号参量和信号波形，由此导致信号检测与估计研究领域的产生。由于被传输的信号本身和各种噪声往往具有随机性，接收设备必须对信号进行统计处理。因此，信号检测与估计就是随机信号的统计处理理论，所要解决的问题是信息传输系统的基本问题。

1. 信号检测与估计的研究对象

实现信息传输的方式和手段很多，主要有：电的和非电的信息传输。电的信息传输是指利用电信号运载信息的传输方式，如电报、电话、广播、电视、遥控、遥测、互联网和计算机通信等。非电的信息传输是指利用人力或机械的方式传递信息，如旌旗、消息树、烽火台及信号灯等。随着社会的需求、生产力的发展和科学技术的进步，目前的信息传输越来越依赖利用电的信息传输方式来传递信息。因为电的信息传输方式迅速、准确、可靠且不受时间、地点、距离的限制，因而近百年来得到了迅速的发展和广泛的应用。

为了利用电的信息传输方式获取并利用信息，人们常需要将信息调制到信号中(也就是通过调制的方式，将信息附加到信号中)，并将载有信息的信号传输给信息的需要者。信息传输就是指从一个地方向另一个地方进行信息的有效传输与交换。为了完成这一任务，需要信号发送设备和信号接收设备。信号发送设备产生信号，并将信息调制到信号中，然后将信号发送出去；信号经过信道的传输到达信号接收设备。信号接收设备接收载有信息的信号，并将信息从信号中提取出来，然后将信息提供给信息需要者。

信息传输离不开信息传输系统。传输信息的全部设备和传输媒介所构成的总体称为信息传输系统。信息传输系统的任务是尽可能好地将信息调制到信号中，有效发送信号，从接收信号中恢复被传送的信号，将信息从信号中解调出来，达到有效、可靠传输信息的目的。信息传输系统的一般模型如图 1.1.1 所示。它通常由信息源、发送设备、信道、接收设备、终端设备以及噪声源组成。信息源和发送设备统称为发送端。接收设备和终端设备统称为接收端。图 1.1.1 所示的信息传输系统模型高度地概括了各种信息传输系统传送信息的全过程和各种信息传输系统的工作原理。它常称为香农(Shannon)信息传输系统模型，是广义的通信系统模型。图中的每一个方框都完成某种特定的功能，且每个方框都可能由很多的电路甚至是庞大的设备组成。

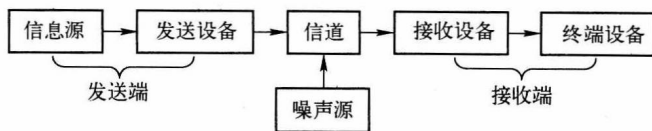


图 1.1.1 信息传输系统模型

信息源(简称信源)是指向信息传输系统提供信息的人或设备,简单地讲就是信息的发出者。信源发出的信息可以有多种形式,但可以归纳为两类:一类是离散信息,如字母、文字和数字等;另一类是连续信息,如语音信号、图像信号等。信源也就可分为模拟信源和数字信源。

发送设备将信源产生的信息变换为适合于信道传输(频段、带宽、功率)的信号,送往信道。如广播电台、电视台、通信发射机及雷达发射机等。

信道是将来自发送设备的信号传送到接收设备的物理媒介(质),是介于发送设备和接收设备之间的信号传输通道,又称为传输媒介(质)。信道分为有线信道和无线信道两大类。

噪声是指信息传输中不需要的电信号的统称。噪声源是信道的噪声以及分散在信息传输系统中各种设备噪声的集中表示。信息传输系统中各种设备的噪声称为内部噪声;信道的噪声称为外部噪声。由于噪声主要是来自信道,通常将内部噪声等效到信道中,这种处理方式可以给分析问题带来许多方便,并不影响主要问题的研究。噪声是有害的,会干扰有用信号,降低信息传输的质量。

接收设备是从受到减损的接收信号中正确恢复出原始电信号的系统。如收音机、电视机、通信接收机、雷达接收机、声呐接收机及导航接收机等。信号检测与估计是接收设备的基本任务之一。

终端设备(也称为受信者或信宿)是将接收设备复原的原始电信号转换成相应信息的装置,如扬声器及显示器等。

信息传输系统模型是一个高度概括的模型,概括地反映了信息传输系统的共性,通信系统、遥测系统、遥感系统、生物信息传输系统都可以看作它的特例。信号检测与估计的讨论就是针对信息传输系统模型而开展的。

信号在传输过程中,不可避免地噪声混杂在一起,受到噪声的干扰,使信号产生失真。噪声与信号混杂在一起的类型有 3 种:噪声与信号相加,噪声与信号相乘(衰落效应),噪声与信号卷积(多径效应)。与信号相加的噪声称为加性噪声,与信号相乘的噪声称为乘性噪声,与信号卷积的噪声称为卷积噪声。加性噪声是最常见的干扰类型,数学上处理最为方便,加性噪声中信号检测与估计问题的研究最为成熟。加性噪声中信号检测与估计也是最基本的,因为乘性噪声和卷积噪声中信号检测与估计均可转换为加性噪声的情况。通过取对数的方法,可以将乘性噪声的情况转换为加性噪声的情况;通过先进行傅里叶变换,再取对数的方法,可以将卷积噪声的情况转换为加性噪声的情况。因此,本书主要讨论加性噪声中信号检测与估计问题。从而,本书所讨论的信号检测与估计的研究对象就是加性噪声情况下的信息传输系统模型。加性噪声情况下的信息传输系统模型如图 1.1.2 所示。

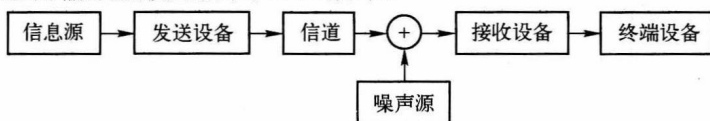


图 1.1.2 加性噪声情况下的信息传输系统模型

在信息传输系统中,匹配滤波器(Matched filter)、信号检测系统及信号估计系统通常是接收设备的基本组成部分,并且是串联的。接收设备的组成框图如图 1.1.3 所示。

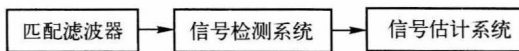


图 1.1.3 接收设备的组成框图

信息传输系统分类的方式很多。按照传输媒质，信息传输系统可分为有线信息传输系统和无线信息传输系统两大类。有线信息传输系统是用导线(如架空明线、同轴电缆、光导纤维、波导等)作为传输媒质完成通信的系统，如市内电话、有线电视、海底电缆通信等。无线信息传输系统是依靠电磁波在空间传播达到传递信息目的的系统，如短波电离层传播、微波视距传播、卫星中继等。

按照信道中传输的信号特征，信息传输系统分为模拟信息传输系统和数字信息传输系统。模拟信息传输系统是利用模拟信号来传递信息的信息传输系统。数字信息传输系统是利用数字信号来传递信息的信息传输系统。

按照应用领域，信息传输系统分为广播、电视、通信、雷达、声呐、导航、遥感及医学等方面。

对信息传输系统的性能要求，主要有两个方面：有效性和可靠性。要求信息传输系统能高效率地传输信息是系统的有效性；要求信息传输系统能可靠地传输信息是系统的可靠性或抗干扰性。有效性衡量系统传输信息的“速度”问题；可靠性衡量系统传输信息的“质量”问题。

使信息传输可靠性降低的主要原因有：① 信息传输不可避免地受到的外部噪声和内部噪声的影响；② 传输过程中携带信息的有用信号的畸变。

携带信息的电磁信号在大气层中传播时，由于大气层和电离层的吸收系数与折射系数的随机变化，必然导致电磁信号的振幅、频率和相位等参量的随机变化，从而引起电磁信号的畸变。

在大气层中传播的电磁信号会受到雷电、大气噪声、宇宙噪声、太阳黑子及宇宙射线等自然噪声的干扰，也会受到来源于各种电气设备的工业噪声和来源于各种无线电发射机的无线电噪声等人为噪声的干扰。这些自然噪声和人为噪声都属于信道的噪声，是外部噪声的主要来源。电磁信号除了受外部噪声的干扰外，还受发送设备和接收设备内部噪声的影响，使得在许多实际情形中，接收设备所接收的有用电磁信号埋在噪声干扰之中，因而难以辨认。信息传输过程中存在的这些外部噪声和内部噪声的干扰，大大降低了信息传输的可靠性。噪声源是信息传输系统中各种设备以及信道中所固有的，并且是人们所不希望的。为了保障信息可靠地传输，就必须同这些不利因素进行斗争，降低这些不利因素的影响。信号检测与估计理论正是在人们长期从事这种斗争的实践过程中逐步形成和发展起来的。

经信道传送到接收端的信号是有用信号和噪声叠加的混合信号，因此接收设备的主要作用是从接收到的混合信号中，最大限度地提取有用信号，抑制噪声，以便恢复出原始信号。

信息传输的目的是通过信号传递信息，它要将有用的信息无失真、高效率地进行传输，同时还要在传输过程中将无用信息和有害信息加以有效抑制。接收设备的任务是从受到噪声干扰的信号中正确地恢复出原始的信息。信号检测与估计是研究信息传输系统中接收设备如何从噪声中把所需信号及其所需信息检测、恢复出来的理论。因此，信号检测与估计理论的研究对象是加性噪声情况信息传输系统中的接收设备。

2. 信号检测与估计的应用

尽管信号检测与估计理论最早由雷达、通信、声呐等领域产生并发展起来的，但它已成为许多学科的理论基础，不仅在自动控制、模式识别、系统识辨、图像处理、语音识别中广泛应用，而且在地震、天文、生物医学工程、化学、物理等学科也得到应用。

监测地震波在大地中传播是一个信息传输系统。地震波在传输过程中，会受到各种干扰，这就需要寻求有效方法，尽量减小干扰的影响，以便从记录下来的地震信号中预测地震的位置和震级。

在石油和天然气勘探中，常用爆破法产生地震波，通过接收这种地震波并加以处理，来获取地层所含石油和天然气的信息。这种通过爆破法获取地震波并进行分析的系统实际是以地层为信道的信息传输系统。应用信号检测与估计理论，可以研究出一套信息提取和分析方法。

在天文学中，利用接收到的天体辐射电磁波，分析射电现象，研究太阳、月亮、各行星等天体内部物理、化学性质，从而形成了一个信息传输系统。由于天体离地面很遥远，因此接收到的信号极其微弱，需要应用信号检测与估计理论。

人的感官是一个信息处理系统，需要处理极其微弱信号，通常把刺激变量看作信号，把刺激中的随机物理变化或感官信息处理中的随机变化看作噪声。感官对刺激的分辨问题可等效为一个在噪声中检测信号的问题。因此，在生物物理中，信号检测与估计理论加深了人们对感官系统的认识和理解。只要知道了人的感官噪声的统计特性，便可应用信号检测与估计理论中有关结果。

1.2 信号检测与估计的内容及研究方法

信号检测与估计的基本任务是：以数理统计为工具，解决接收端信号与数据处理中的信息恢复与获取问题，即从被噪声及其他干扰污染的信号中提取、恢复出所需的信息。具体讲就是，研究如何在干扰和噪声的影响下最有效地辨认出有用信号的存在与否，以及估计出未知的信号参量或信号波形本身。它实质上是有意识地利用信号与噪声的统计特性的不同，来尽可能地抑制噪声，从而最有效地提取有用信号的信息。

1. 信号检测与估计的内容

根据信号检测与估计的基本任务，信号检测与估计的内容主要包括 3 个方面：匹配滤波、信号检测及信号估计。

(1) 匹配滤波

匹配滤波就是从含有噪声的接收信号中，尽可能抑制噪声，提高信噪比。匹配滤波是利用信号与噪声各自的统计特性和它们之间的相关性，来提高信噪比的。

(2) 信号检测

信号在传输过程中受到噪声的影响，使得信号接收设备很难判断信号是否存在或哪种信号存在。信号检测就是在噪声环境中，判断信号是否存在或哪种信号存在，也可以说是信号状态的检测。

信号检测分为参量检测和非参量检测。以已知信道噪声概率密度为前提的信号检测称为参量检测。信道噪声概率密度为未知的情况下的信号检测称为非参量检测。

(3) 信号估计

在信号接收设备中，不仅要知道信号是否存在或哪种信号存在，还要知道信号的参量，或更进一步地需要知道信号的波形，这一方面的内容就是信号估计。信号估计就是在噪声环境中，对信号的参量或波形进行估计。信号估计又包括两个方面的内容：信号参量估计和信号波形估计。

信号参量估计是指对信号所包含的参量(或信息)进行的估计，所关心的不是信号波形，而是信号的参量，属于静态估计。

信号波形估计是指在线性最小均方误差意义下,对信号波形进行的估计,所关心的是整个信号波形本身,属于动态估计。

信号检测与估计的3个方面的内容,相互之间有着密切的联系,不可能截然分开。信号检测与信号估计既可以依次进行,有时也可以同时进行,或者是交互进行。匹配滤波既可以在信号检测或信号估计之前进行,也可以穿插在信号检测或信号估计之中进行。

2. 信号检测与估计的研究方法

信号检测与估计的数学基础是数理统计中的统计推断或统计决策理论。统计推断或统计决策均是利用有限的资料对所关心的问题给出尽可能精确可靠的结论,均是关于做判决的理论和方法,两者的差别仅在于是否考虑判决结果的损失。它们具有深刻的统计思想内涵和推理机制,是各种数理统计方法的基础。从数理统计的观点看,可以把从噪声干扰中提取有用信号的过程看作是一个统计推断或统计决策过程,即用统计推断或统计决策方法,根据接收到的信号加噪声的混合波形,做出信号存在与否的判断,以及关于信号参量或信号波形的估计。

数理统计中的统计推断或统计决策针对的是随机变量,而信号检测与估计针对的是随机信号的统计推断或统计决策,故信号检测与估计是对数理统计中的统计推断或统计决策的拓展。

假设检验和参数估计是数理统计的两类重要问题,可以采用统计推断或统计决策的理论和解决方法来解决这两类问题。

- 检测信号是否存在用的是统计推断或统计决策的理论和解决方法来解决随机信号的假设检验问题。假设检验是对若干个假设所进行的多择一判决,判决要依据一定的最佳准则来进行。信号检测是对数理统计中假设检验的拓展。
- 估计信号的未知参量用的是统计推断或统计决策的理论和解决方法来解决随机信号参数估计问题,即根据接收混合波形的一组观测样本,来估计信号的未知参量。由于观测样本是随机变量,由它们构成的估计量本身也是一个随机变量,其好坏要用其取值在参量真值附近的密集程度来衡量。因此参量估计问题是:如何利用观测样本来得到具有最大密集程度的估计量。信号参量估计是对数理统计中参数估计的拓展。

估计信号波形则属于滤波理论,即维纳(Wiener)和卡尔曼(Kalman)的线性滤波理论以及后来发展的非线性滤波理论。

信号检测与估计的研究方法:用概率论与数理统计方法,分析接收信号和噪声的统计特性,按照一定准则设计相应的检测和估计算法,并进行性能评估。主要体现在如下3个方面:用概率密度函数、各阶矩、相关函数、协方差函数、功率谱密度函数等来描述随机信号的统计特性;用数理统计中的判决理论和估计理论进行各种处理和选择,建立相应的检测和估计算法;用判决概率、平均代价、平均错误概率、均值、方差、均方误差等统计平均量来度量处理结果的优劣,建立相应的性能评估方法。

信号检测与估计研究方法的实施过程归纳起来有以下4个步骤。

(1) 信号检测与估计将所要处理的问题归纳为一定的系统模型,依据系统模型,然后运用概率论、随机过程及数理统计等理论,用普遍化的形式建立相应的数学模型,以寻求普遍化的答案和结论或规律。

(2) 信号检测与估计主要依据数理统计中的统计推断或统计决策的理论和方法,采用最优化的方法寻求最佳检测、估计和滤波的算法。

(3) 根据检测和估计的性能指标,分析最佳检测、估计和滤波算法的性能,以判别性能是

否达到最优。

(4) 结合工程实际, 根据最佳检测、估计和滤波的算法构造最佳接收、估计和滤波的系统模型。

1.3 信号检测与估计课程与其他相关课程的关系

信号检测与估计是研究不确定性随机现象规律的课程(分支学科)之一, 其他主要研究不确定性随机现象规律的课程(分支学科)有: 概率论、数理统计及随机过程(或随机信号分析)。

大多数教科书及文献认为, 概率论是研究随机现象数量规律的一门学科, 是数学的分支学科。其实, 这个术语界定的范畴有些偏大。实际上, 概率论是研究随机变量及其统计特性的性质和规律的一门学科。

数理统计是运用概率论的知识, 研究如何有效地收集、整理和分析带有随机性的数据, 以对所考察的问题做出统计推断、预测或者决策的一门学科, 是数学的分支学科。

概率论与数理统计研究的对象均是随机变量, 但研究方法不同。在概率论中, 是在假定概率分布已知的情况下研究随机变量的性质和特点的。在数理统计中, 是在随机变量概率分布未知的前提下通过对所研究的随机变量进行重复独立的观察, 并对观察数据进行分析, 从而对所研究的随机变量的分布做出推断。

概率论是数理统计的基础, 数理统计需要应用概率论的知识, 但是它们是两个并列的数学分支学科, 并无从属关系。概率论是对随机现象统计规律进行演绎的研究, 而数理统计则是对随机现象统计规律进行归纳的研究。

概率论与数理统计研究的对象均是随机变量, 而不是随机过程。随机过程是反映随着时间变量(或其他变量)而变化的随机现象的物理量。随机过程是随机变量概念的拓展。在电子信息工程领域, 随机过程常称为随机信号。

随机信号分析及信号检测与估计研究的对象均是随机信号。

随机信号分析是研究随机信号及其统计特性的性质和规律, 以及随机信号通过系统的理论和分析方法的一门学科。它可以看作是概率论的研究内容向随机信号研究对象的扩展。

信号检测与估计是研究在噪声、干扰和信号共存的环境中如何正确发现、辨别和测量信号的一门学科。它可以看作是数理统计的研究内容向随机信号的扩展。有些文献也将信号检测与估计称为统计信号处理。

概率论、数理统计、随机信号分析及信号检测与估计构成研究随机现象规律的主干, 也是科技工作者所具有的知识结构的重要组成部分。

学习和研究信号检测与估计应具备一定的概率论、随机过程及数理统计的预备知识。除此之外, 也应具备一定的信号与系统的预备知识。

信号与系统是研究确定信号的表示和性质, 线性时不变系统的特性和功能, 以及信号通过线性时不变系统的基本分析方法的一门学科。

1.4 内容编排和学习建议

信号检测与估计是随机信号统计处理的理论和方法, 或者用数理统计的方法研究随机信号处理的理论和方法。它与概率论、数理统计及随机信号分析(或随机过程)并驾齐驱地支撑着随机现象规律的研究, 它们共同构成了科技工作者研究随机现象的完整知识结构。因此, 信号检测与估计是“信息与通信工程”学科的重要基础课, 是电子信息工程、通信工程、电子信息科

学与技术, 以及电子科学与技术等专业的专业基础选修课。

通过本书的学习, 读者应了解信号检测与估计的统计处理方法的特点, 掌握信号检测与估计的基本概念、理论和方法, 建立随机信号统计处理的观念和思维方法, 提高用统计处理方法解决问题的能力, 能对工程实际中应用的系统建立数学模型, 并对数学模型进行统计求解。

1. 内容编排

本书在数学分析的基础上, 注重物理概念及分析方法, 对复杂的理论和数学问题着重用与实际的电子工程技术问题相联系的途径和方法去处理。

本书的主要内容分为 3 部分: 匹配滤波、信号检测及信号估计。每一部分所包含的内容如下:

第一部分是匹配滤波, 由第 2 章组成, 重点讨论匹配滤波器理论, 包括白噪声背景下和色噪声背景下的匹配滤波器。由于对于其他内容, 匹配滤波器具有相对的独立性, 它又是信息传输系统中接收设备最佳检测系统和最佳估计系统的基本组成部分, 是信息传输系统中接收设备的重要组成部分, 因此, 根据信息传输系统对信号的处理流程及匹配滤波器的作用和重要性, 将匹配滤波器作为一章单独讨论。

第二部分是信号检测, 由第 3 章至第 7 章组成, 重点论述信号的统计检测理论和技术, 包括信号模型、最佳检测准则、检测系统的结构、检测性能的分析 and 最佳波形设计等内容。信号检测分为参量检测和非参量检测。参量检测由第 3 章至第 6 章组成, 主要讨论信道噪声概率密度为已知情况下的信号检测。非参量检测由第 7 章组成, 是信道噪声概率密度为未知的情况下的信号检测。

第三部分是信号估计, 由第 8 章至第 10 章组成, 主要讨论信号参量及信号波形的估计。信号估计分为信号参量估计和信号波形估计。信号参量估计由第 8 章和第 9 章组成, 主要讨论信号参量的最佳估计理论和算法, 包括最佳估计准则, 估计量的构造和主要性质等内容。信号波形估计由第 10 章组成, 主要讨论信号波形估计的概念、准则, 维纳滤波和卡尔曼滤波算法等内容。

本书内容编排的结构图见附录 A。

为了使信号检测与估计的基本概念和理论更清晰, 使读者把握信号检测与估计的实质和方法论, 本书强调并阐述了信号检测与估计所依赖的数学基础——贝叶斯统计。为了提高读者用统计处理方法解决问题的能力, 在内容的叙述和问题的分析中, 始终强调随机信号统计处理的思维观念和方法。

为了使读者深刻理解和掌握信号检测与估计的方法和过程, 本书构建了相应的模拟实验, 并以附录 B 的形式给出实验指导书; 为了使读者巩固所学知识, 本书精选了一定数量的思考题和习题。

2. 学习方法的建议

信号检测与估计是随机信号分析(或随机过程)与数理统计的结合, 也可以看作是数理统计由针对随机变量到针对随机信号(或随机过程)的扩展。根据这一特点, 下面给出几点学习方法的建议, 以供读者参考。

(1) 建立随机信号统计信号处理的观念及思维方法。对随机信号统计信号处理方法, 概念要清楚, 思路要清晰。具体讲, 就是对随机信号的统计描述、统计意义上的最佳处理、性能的统计评估等概念要清楚, 分析思路要清晰。有些读者对信号检测与估计解决问题的方法不适应, 究其根本原因是: 没有从解决确定问题的方法观念上转变到解决随机问题的统计处理方法观念上。

(2) 在一定数学分析的基础上,从物理意义上加深理解。作为随机信号统计处理的理论,数学符号多,数学表示式多,数学分析多,往往让学习者感到内容繁杂,无所适从。其实,数学符号及数学表示式是一种语言,它们只是一定物理概念、物理现象、客观规律及系统模型的物理意义的表达方法,是我们可以用语言叙述出来或用文字写下来内容的一种简洁表示方式。为了克服数学符号多、数学表示式多及数学分析多所形成的客观困难,学习者一定要注意数学符号及数学表示式所代表的物理意义,从物理意义上而不仅限于数学表示式上加以理解,最好能够将数学符号及数学表示式所代表的物理意义用语言叙述出来,避免将内在的涵义淹没在公式推导的海洋中,有助于提高分析、解决随机现象问题的能力。

(3) 信号检测与估计中的核心问题是最优化问题,例如检测的最优化、估计的最优化及滤波的最优化。因此,一定要注意和掌握不同内容中的最优化的方法,包括如何根据实际问题的物理意义建立最优化问题的目标函数,求解最优化问题的方法。

(4) 信号检测与估计研究的是系统处理随机过程的行为。描述这样行为的数学模型,不但包括信号模型,还要包括统计模型。在信号检测与估计的学习中,遗漏统计模型的情况很容易发生,而描述随机现象,统计模型是必不可少的,这种情况希望引起读者的注意,以避免类似情况发生。

(5) 信号检测与估计的最终目标是设计出(或求出)信息传输系统中接收设备的最佳检测算法(或最佳检测数学模型)、最佳估计算法(或最佳估计数学模型),并进一步给出相应的最佳检测系统模型、最佳估计系统模型。不要因繁杂的数学推导而将这一点掩盖住。

(6) 无论是信号检测,还是信号估计,最佳准则或最佳算法较多,读者一定要注意每一种最佳准则或最佳算法的前提条件以及适用范围,以免混淆,影响以后的研究和实际应用。

(7) 信号检测与估计理论从实际需求牵引中产生,但作为基础理论,又做了相应的抽象概括。故此,读者在学习过程中,一定要将所学内容和自己专业领域的相关实际应用联系起来,为将来的实际应用奠定基础。

(8) 信号检测与估计的学习可分成两个层次。第一个层次是信号统计处理技能的学习。这是一个最基础、最重要的层次,这一层次的学习属于技能学习,需要选做一定量的习题,以巩固、加深和扩展对所讨论问题的基本概念和基本方法的掌握,有助于加强所学内容和实际的联系,学会应用。第二个层次是对统计思想的学习。所谓统计思想,讲的是一种认识问题的方法,就是从随机信号中加工、提炼所需的信息,就是各种统计方法所依赖的原理。这一层次的学习属于能力学习,必须经过深入思考,广泛的联系与比较。当然,这个过程不是一次就能完成的,一般要经过初步理解→广泛练习→逐步深刻理解的循环。

总之,若要较好地掌握信号检测与估计理论,一定要注重物理意义、模型的概念及统计处理的观念。

本章小结

本章是信号检测与估计的总论,旨在使读者从总体上对信号检测与估计有个基本的认识,形成完整的观念,对信号检测与估计的学科性质、研究对象、研究思路、研究方法和任务有个总的理解,为读者更好地掌握信号检测与估计的内容和分析方法提供参考。学习本章的具体要求有:① 理解信号检测与估计的研究对象,了解信号检测与估计的应用。② 认识信号检测与估计的任务及内容,理解信号检测与估计的研究方法。③ 认识信号检测与估计课程与其他相关课程的关系,理解信号检测与估计的特点。④ 把握本书内容编排的逻辑关系,领会信号检测与估计的内涵和外延。⑤ 了解学习本书的建议,增强统计处理的观念。