

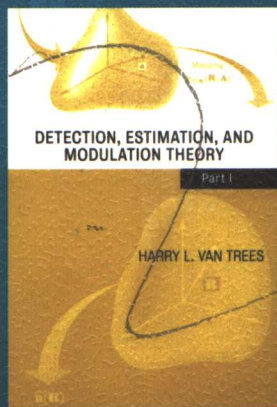
国外电子与通信教材系列



范特里斯

检测、估计和 调制理论

卷 I 检测、估计和线性调制理论



Detection, Estimation,
and Modulation Theory

Part I

Detection, Estimation,
and Linear Modulation Theory

[美] Harry L. Van Trees 著 张其善 毛士艺 周荫清 译

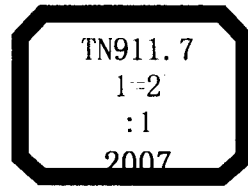


电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

权威作者
经典力作

国外电子与通信教材系列



检测、估计和调制理论

卷 I 检测、估计和线性调制理论

Detection, Estimation, and Modulation Theory

Part I Detection, Estimation, and Linear Modulation Theory

[美] Harry L. Van Trees 著

张其善 毛士艺 周荫清 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

迄今为止,本书仍然是公认的关于检测、参数估计和线性与非线性调制波形估计方面的一本论述详尽、深入、成功的著作。也是一本较好的研究生教材。内容是研究发生在通信、雷达和声呐中被噪声污染了的各种线性与非线性调制、随机与非随机波形的最佳处理的数学方法和物理结构,各种系统可能达到的性能极限和影响它的各种因素。全书包括导论、经典检测和估计理论、随机过程的描述、信号检测与信号参数估计、连续波估计、线性估计和讨论等7章。每章附有相当数量的扩大内容范围的习题。

本书的对象是从事通信、雷达、声呐、信息理论与信息处理等方面的工程技术人员、研究生和高等院校的教师。

Harry L. Van Trees: *Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I: Detection, Estimation, and Linear Modulation Theory*.

ISBN 0-471-09517-6. Copyright © 2001 by John Wiley & Sons, Inc. All Rights Reserved.

AUTHORIZED TRANSLATION OF THE EDITION PUBLISHED BY JOHN WILEY & SONS, INC., New York, Chichester, Weinheim, Singapore, Brisbane, Toronto. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

Simplified Chinese translation edition Copyright © 2007 by John Wiley & Sons, Inc. and Publishing House of Electronics Industry.

本书中文版由电子工业出版社和 John Wiley & Sons 合作出版。此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港和澳门特别行政区)销售。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字:01-2006-7344

图书在版编目(CIP)数据

检测、估计和调制理论. 卷I. 检测、估计和线性调制理论 / (美)范特里斯(Van Trees, H. L.)著;张其善,毛士艺,周荫清译. -北京:电子工业出版社,2007.3

书名原文: Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I: Detection, Estimation, and Linear Modulation Theory

(国外电子与通信教材系列)

ISBN 978-7-121-03859-4

I. 检... II. ①范... ②张... ③毛... ④周... III. ①信号检测 - 研究生 - 教材 ②参数估计 - 研究生 - 教材 ③线性调制 - 研究生 - 教材 IV. TN911.23

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第017506号

责任编辑:许菊芳

印刷:北京季蜂印刷有限公司

装订:三河市皇庄路通装订厂

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:31.75 字数:813千字

印次:2007年3月第1次印刷

定价:55.00元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。邮购电话:(010)88254888。

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

服务热线:(010)88258888。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

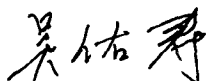
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入 21 世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入 WTO 后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在 2000 年至 2001 年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了 40 余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择和自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

主任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
委员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘彩	中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长

中译本再序

二十多年前,本书作者 H. L. Van Trees 曾亲自为中译本写过序言,中国科学院电子所陈宗鹭教授也为当时的中译本写了序言(分别见后面的中译本序和中文版序),他们在序言中的观点和论述至今依然完全适用。

检测和估计原属数理统计中的内容,20世纪60年代初,美国出版了一系列通信统计理论、信号检测理论方面的著作,将检测和估计的数学方法引入工程界和研究生教育。Van Trees 的检测、估计和调制理论以其详尽、系统、丰富的内容和深入浅出的流畅的文笔在全球各大学和国内通信、信号处理界都产生了极大的反响。Van Trees 曾在欧洲和前苏联巡回讲演。

本书论述问题的鲜明特点是:引入问题清晰,用一大类与论题相关的应用背景来衬托所抽象问题的意义;多种思路的求解途径和方法;数学推导、性质和物理本质的描述十分详尽;基本的结论在不同场合以不同的方式加以论述,逐步深入;大量的实例帮助读者理解其在工程中的应用、最佳的设计方案及可能达到的性能边界;习题是正文的详尽补充和延续,许多在其他著作中为正文或一篇短文的内容被编在习题中,由读者独立完成、证明或推广某些定理,帮助学生更加深入地掌握和应用理论。

在工程界最初学习原属数理统计数学范畴的内容时,曾有不少难以理解的问题。读完本书之后,许多含糊疑惑的概念得到满意地澄清。国内许多早期从事通信、雷达和声呐信号处理研究和教学的工程师、教授都系统地读过这本巨著,对他们的学术生涯有深远的影响和启示。

全套书共分为四卷,其中卷 I(即本书)是检测、估计和线性调制的基本内容。本书第 2 章是检测和估计理论的经典数学基础。第 3 章是对随机过程的正交表示、积分方程性质的简练独特的描述,第 4 章讲解信号检测和参数估计。这三章的清晰描述、讨论及其紧密的衔接正是本书介绍检测估计理论的成功所在。第 4 章包括十分丰富的通信和雷达中的检测、线性和非线性估计问题、各种调制方案、信道和噪声特性下的最佳接收机结构、性能边界等。第 5 章的波形估计一般理论至今仍是本书的一个特点。本书介绍的一般波形估计的表示式、性质在其他同类的著作中均未曾有过。在此基础上,作者用两部分分别描述线性调制和非线性调制的波形估计。在第 6 章线性调制中,有关线性滤波和黎卡蒂方程的十几个性质是至今向工程界讲述滤波理论中最深入、透彻的内容。非线性调制则是卷 II 的全书内容。卷 III 讲述随机波形的检测和估计及其在雷达、声呐中的应用。有关阵列和空时处理的内容安排在卷 IV。整套书共 3115 页,确实是一部罕见的宏篇巨著。

卷 I 是全套书的经典和基础部分,自第一次出版以来已经历了 39 年,在美国再版了 32 次,至今仍是一本在世界范围内被广泛采用的久经时间考验的巨著,它教育了一代又一代的工程师,是该领域最受广泛阅读的研究生教材和参考书。它用统一的方法介绍检测、估计和调制理论,在通信、雷达、声呐、地震、生物工程、射电天文学中都有重要的应用价值。

20 世纪 70 年代末,我就想将此书的内容介绍给学生,1978 年实行研究生教育后得以实现,并多次讲授此课,每次讲授对本书的精髓都有新的发现,惊叹作者在撰写本书时的精心安排。

10 年前,本书作者 Van Trees 教授访问北京,他向我讲述了他曾对美国一家出版社要他按当时科技发展的新动向重写检测、估计和调制理论时说的话:除了原书中的内容之外,已没有什么

东西可再写了。本书出版已近 40 年,信号处理技术及应用有了新的巨大的发展和变化。数字处理代替了模拟处理,极强处理能力的计算技术突飞猛进,许多本书最初出版年代的理论结果和复杂的算法已得以实现。尽管本书强调连续处理方式,但进入离散的表示是直接的。新理论的概念和本书的内容仍然紧密相关。

当今国外在评述本书时写道:今天的专业研究人员、工程师和研究生在最优处理问题上需要读本书的迫切性如同本书刚出版的三十多年前。我同意这一观点,并感谢电子工业出版社将此书介绍给广大的中国读者。

毛士艺

2007 年 2 月 1 日于北京航空航天大学

中译本序

美国麻省理工学院教授 H. L. 范特里斯所写的《检测、估计和调制理论》一书(全套书分为三卷^①出版)是一部享有世界声誉的、相当成功的重要著作。它是作者多年来为研究生开设的课程、多次修改充实的讲稿,又是作者及其同事们在这一领域研究成果的反映。

检测与估计的统计理论是当代信息科学的一个重要组成部分,是一门工程学科。它是概率论、数理统计、系统理论和通信工程(广义的通信工程包括雷达、声呐等信息传输和处理系统)相结合的边缘学科,具有很强的生命力。从 20 世纪 40 年代初期第二次世界大战中发展起来以后,进展很快,几乎每经历 10 年就有一次新的重要突破,就有一系列的重要著作出现。

整个 20 世纪 40 年代是这一理论的初创和奠基性时期,前苏联科学家柯尔莫哥洛夫和美国科学家维纳等人做出了杰出的贡献。在 20 世纪 50 年代,对维纳理论的研究和发展取得了不少成果并已把它推广到非平衡以及时变的条件下。拉斯匹配滤波器理论在雷达和通信系统中也得到了广泛的应用。到 20 世纪 50 年代末,出现了好几本总结性的重要著作,表征着理论发展第一阶段的成熟。

另一方面,到了 20 世纪 50 年代后期,随着各个领域科学技术的发展,特别是空间技术和数字计算机技术的发展,第一阶段的检测和估计理论无论在理论本身的局限性以及在实际应用方面,都暴露了许多弱点(这也是工程科学发展的一般规律:从工程实践总结提高到理论,理论又去指导实践,实践提出的新问题又促进理论的向前发展)。维纳的滤波理论满足不了空间技术所要求的实时精密跟踪、测量与控制。在雷达和声呐技术中普遍应用检测和估计理论也由于实际工程中噪声概率分布的多样性和特殊性而遇到了困难。

于是人们开始探索新的理论和技术途径。20 世纪 60 年代就有了突破,出现了卡尔曼-布西滤波理论。他们将状态变量法引入到了滤波理论中来,用信号和噪声的状态空间模型代替了协方差函数,用时域的微分方程来表示滤波问题,得到了递推滤波算法。它突破了平稳过程的限制,更没有无限时间的要求。它的一个优点是得到了一个可以用计算机求解的非线性微分方程(黎卡蒂方程),适于做实时处理。理论的这一突破很快就成功地应用于卫星轨道测量、导弹制导和自动化等许多领域。整个 20 世纪 60 年代主要向应用方面发展。

范特里斯的著作产生于 20 世纪 60 年代末,从时代背景和它的主要内容来看,人们确实可以把它看成是检测与估计理论领域的又一次成功的总结性的贡献(调制理论实质上是连续波形估计理论)。

这次译成中文的是全书的第一部分(卷 I),也是全书的基础。由于它的基础性的特点以及作者在材料安排上的很强的逻辑性,清楚易懂的叙述方式以及大量的例题和习题,都使它特别适宜于作为研究生的教材,也可作为大学高年级优秀学生和在职的有志于在这一领域深造的科研人员和工程师们的自学材料。

我建议对初学者来说,认真读一下第 1 章是很有益处的。在导论里可以看到作者是如何精心地安排材料,使读者很快就能看到检测与估计理论这一领域的全貌,从而引起兴趣。作者由

^① 实际上,全书最后是按四卷出版的。——编者注

深入浅出、清楚地描述了这一领域的一层一层的许多问题以及处理问题的方法。这种启发性和逻辑性的安排是引人入胜的。这是本书的一个显著特点,并贯彻在本书的全过程。这就使这卷书虽然出版至今已经十多年^①,国外许多大学仍用它作为研究生教材的原因。

在第2章,作者从经典的贝叶斯以及奈曼-皮尔逊的观点出发,介绍了判决理论的一些基本方面。在讨论各种估计准则时,就把这些基本思想推广到估计问题,并且也论述了这些准则可以应用的条件。这一章的最后讨论了多参数估计和高斯噪声条件下的一些特殊结果。

第3章叙述了随机过程的表示方法。这是为讨论信号检测、参数估计和连续波形估计问题做数学准备的。开始就介绍卡亨南-洛维展开式和有关的积分方程的性质,随后讨论平稳随机过程的谱表示法,最后讨论了矢量随机过程。这一章是有一定深度的。读者最好先阅读戴温波特和罗特合定的一本名著《随机信号与噪声理论导论》。第2章和第3章是全书的基础。

第4章开始介绍信号检测与参数估计问题。讨论从噪声信道中的通信问题为例子展开,包括已知参数的信号和未知参数的信号在白高斯噪声和非白高斯噪声中的检测和估计问题,由浅入深,叙述清楚。

第5章简单地叙述了连续波形的估计问题(调制理论),反映了作者当时在这一领域的一些最新研究成果,是一种对线性调制和非线性调制均有价值的最大后验概率估计法。

第6章详细讨论了线性最小方差估计法,总结了维纳和卡尔曼两类方法。前者用线性系统中的冲激响应和系统函数表示法(频域方法)得出著名的维纳-何甫积分方程和它的解,后者用微分方程状态空间方法(时域方法)得到卡尔曼-布西滤波器和黎卡蒂方程。这一章的最后讨论了线性调制信号的最佳解调问题。

作者把连续波形的非线性估计问题(非线性调制)作为一个单独部分放在卷II中,而把随机信号的检测和估计问题作为全书的卷III。

总之,这次译出的卷I是全书的基础,读者可以从中得到许多有益的启示和坚实的理论基础,由此继续深造也就不难了。

此外,译者还改正了原书中的某些疏漏。

陈宗鹭

1981年5月于中国科学院电子学研究所

^① 该序写于1981年,故按此时间计算。后面文中的时间问题也按此处理。——编者注

中文版序

15年前,1967年我曾为《检测、估计和调制理论》的卷I“检测、估计和线性调制理论”写了序言。此后,卷I已再版9次并仍然广泛用于全世界各研究生院。在20世纪70年代曾译成俄文。成千上万的学生已从卷I以及它的两个姊妹篇:卷II“非线性调制理论”、卷III“雷达-声呐信号处理和噪声中的高斯信号”,学到了检测、估计和调制理论的一系列基本原理。我非常高兴有机会为中文版写序言。中译本将使本书内容在一大批中国学生和教师中得到传播。几年来在美国和我一起进行研究的,以及在参观北京、上海和广州时所遇到的中国学生的聪明、勤奋的工作品德都给我留下了深刻的印象。他们的素质对研究本书所涉及的内容是极为合适的。

15年来,《检测、估计和调制理论》三卷书仍在继续使用,有几个原因:第一是在这个时期中,在诸如数字通信、卫星通信、雷达、声呐、地震分析和医学诊断等领域中这一理论的应用在不断增长。第二是数字处理速度和存储量增强了几个数量级。这一增加使许多系统中实现了最佳或接近最佳的实际算法。第三是本书的结构。三卷书中极为详细地研究了所涉及的理论,因此勤奋的学生能够理解这些结论的前提、应用和它们的限制。这些方法为所得结果应用或推广到新的场合奠定了基础。

原序言中的许多建议仍然是有效的。为了获得更好的了解,我们从不同角度考察许多问题,读者应当详细讨论不同的方法。最重要的建议是做习题。不做大量习题要理解这些结论是不可能的。

在卷I的序言(美国版)中,我指出了卷II要完成的工作。实际上,卷II成了关于非线性调制理论的一本扼要的专著,因此包括雷达、声呐信号处理和噪声中高斯信号的卷III就显得非常必要了。当我完成卷III的时候,我还有500页计划编写题为“阵处理”的卷IV的手稿。在这些材料中,我把前三卷的许多结论推广到多维随机过程并指出怎样把这些理论应用到通信、雷达和声呐等领域中的大量阵处理问题。有关自适应天线的几章提供了检测和连续波估计的有意义的综合。但是在1972年5月,我离开了麻省理工学院,成为美国国防通信署的首席科学家,因而这些材料未曾正式发表。这是令人遗憾的,因为最佳阵处理的应用,在卫星通信、飞机通信、声呐和雷达系统中已经迅速扩大。它们中的大部分都应用了卷IV的结论。

我十分感谢负责卷I译文的北京航空航天大学毛士艺教授所起的作用。

Harry L. 范特里斯

1982年1月于弗吉尼亚州马克林

序 言

本书所要研究的检测与估计理论的内容,是将统计推断的经典方法与通信、雷达、声呐和其他现代数据处理系统的随机过程特征加以综合性的阐述。统计推断的两个主要领域是判决理论和估计理论。判决理论,是指观测一个具有随机特性的输出,并判断产生这个输出的两个因素中谁为真。在 18 世纪中叶,詹姆斯·贝叶斯[1]曾研究过这类问题。关于估计理论,其输出与某一有意义的参数有关,而我们正是试图去估计这个参数值。在 19 世纪初,勒让德[2]和高斯[3]曾经发表过这方面的著作。三十多年前,费什尔[4]、奈曼和皮尔逊[5]对作为本书经典的检测理论做出了重要贡献。1941 年和 1942 年,柯尔莫哥洛夫[6]和维纳[7]把统计方法应用于解决最佳线性滤波问题。此后,统计方法用于各类系统综合和分析就得到了迅速发展。本书研究的主题是讨论这些方法的应用和所得结论的本质。

本书(卷 I)及其续卷“检测、估计和非线性调制理论”(卷 II)的内容取材于“检测、估计和调制理论”课程的讲稿。在麻省理工学院,这门课程是为高年级研究生开设的。我对这些内容最初的兴趣产生于我在模拟调制理论方面的研究活动。研究调制理论的初始文本在 1964 年曾用做麻省理工学院开设的夏季课程的教材。结果表明,如果听众对于现代检测和估计理论有透彻的了解,就能非常好地理解调制理论的观点。当时,还没有一本合适的教材,能够概括那些有价值的内容以及重点阐明我感到重要的那些论点,于是我开始写讲义。显然,在一个适当的时间里,将这些材料介绍给研究生,就要研究三个课题:检测、估计和调制理论的统一提法,以及探索联系它们的基本概念。进行的结果,原来打算作为调制理论基础的材料,最后占据了本书的整个内容。有关调制理论的原始材料在卷 II 的前面几章介绍。总体而言,这两本书提供了有关检测、估计和调制理论三个课题的一个统一的观念以及它们在许多重要的具体问题中的应用。

近三年来,我又陆续提出了关于本课程内容的修改意见。听众一般由 40~50 名学生组成,他们已经学完了有关随机过程的研究生课程,这些内容大部分包括在戴温波特和罗特的著作[8]中。总的说来,他们对随机过程理解得比较透彻,并具有相当的能够解决问题的常规运算的实践。此外,他们当中的许多人对于在这个领域或与此密切相关的相邻领域进行研究是有兴趣的。这种兴趣形成了极大的动力,利用这种动力,我要求他们以做习题的方式发展许多重要的概念。本书最初就是为这些听众编写的。

另一方面,许多从事系统研究的实际工程师,已经或将要用本书中提出的统计方法来分析或设计各种系统,我力求使本书对他们有所裨益。较早的一个版本曾成功地用做研究工程师的内部课程的教材。

从对专业基础知识的要求来看,本书不需要高深的基础知识。当然,有关基础概率论的知识和随机过程二阶矩的特性应已掌握。熟悉一些矩阵理论和线性代数是有益的,但不一定是必需的。数学的严谨程度不高,不过,本书大多数章节的结论,只要在推导中精心一点就可以得到严格的证明。采取这种方法是为了不致使那些重要的概念与许多细节问题混淆起来,也为使这些内容便于需用这本书的工程技术人员阅读。幸而,几乎在所有的场合我们都能验证答案在直观上是合乎逻辑的。值得注意的是,即使推导是严格的,但仍然需要有直观地检验答案的能力,因为我们的根本目的是获得一个与某一有价值的实际系统相当的答案。容易遇到这样一类物

理问题,其数学模型似乎是合理的,经过正确的数学运算以后,却导致出一个对原来问题的不可实现的答案。

本书有几个适于叙述的特点。总的来说,考察一个问题是相当详细的。为了更好地理解所得结论的含义,总是用几种不同的方法,多次考察同一个问题。同时注意教给学生一些处理总结的方法,以便帮助他们较灵活地探讨新问题。第二个特点,为了使读者透彻地理解本书的内容,做习题是不可缺少的。本课程和本书都强调提高解决问题的能力。每章末尾附有习题,包括的范围从一般运算直到本书内容的一些有意义的扩展。在许多情况下,它们与当时杂志上发展的论文相当。只有做适当数量的习题,才有可能体会出上面结论的重要性和普遍性。对于个别问题的解答,可来函索取。有一本包含有三分之一的习题解答的书可供讲授这门课的教师使用。我们正在不断地拟制与本课程有关的新习题,并且可以将这些习题寄送给应用本书作为教材的任何人。第三个优点是本书中方块图、略图和插图比较丰富。采用这些图表是因为大多数工程师(包括我本人)对这些方式比相应的方程式更为熟悉。

通常遇到的一个问题是要选用许多学科所必需的符号,我们力求以合理的方式选择符号,并尽量使其便于记忆。全部符号都归纳在本书末尾的术语汇编中。我们力求使参考文献尽量完整,并尽可能地承认属于别人的任何概念。

H. L. 范特里斯

1967年10月于马萨诸塞州剑桥

参考文献

- [1] Thomas Bayes, "An Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances," *Phil. Trans.*, 53, 370-418 (1764).
- [2] A. M. Legendre, *Nouvelles Méthodes pour La Détermination ces Orbites des Comètes*, Paris, 1806.
- [3] K. F. Gauss, *Theory of Motion of the Heavenly Bodies Moving About the Sun in Conic Sections*, reprinted by Dover, New York, 1963.
- [4] R. A. Fisher, "Theory of Statistical Estimation," *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 22, 700 (1925).
- [5] J. Neyman and E. S. Pearson, "On the Problem of the Most Efficient Tests of Statistical Hypotheses," *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A 231, 289, (1933).
- [6] A. Kolmogoroff, "Interpolation and Extrapolation von Stationären Zufälligen Folgen," *Bull. Acad. Sci. USSR, Ser. Math.* 5, 1941.
- [7] N. Wiener, *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series*, Tech. Press of M.I.T. and Wiley, New York, 1949 (originally published as a classified report in 1942).
- [8] W. B. Davenport and W. L. Root, *Random Signals and Noise*, McGraw-Hill, New York, 1958.

目 录

第 1 章 导论	1
1.1 论题提要	1
1.2 可能的方法	7
1.3 编排方式	10
第 2 章 经典检测和估计理论	12
2.1 引言	12
2.2 简单二元假设检验	14
2.2.1 判决准则	15
2.2.2 性能:接收机工作特性	24
2.3 M 元假设	33
2.4 估计理论	36
2.4.1 随机参数:贝叶斯估计	37
2.4.2 实(非随机)参数估计	45
2.4.3 多参数估计	52
2.4.4 估计理论小结	61
2.5 复合假设	62
2.6 一般高斯问题	70
2.6.1 等协方差矩阵	71
2.6.2 等均值矢量	78
2.6.3 小结	85
2.7 性能边界和近似式	86
2.8 小结	98
2.9 习题	99
参考文献	126
第 3 章 随机过程的表示法	128
3.1 引言	128
3.2 确定性函数:正交表示法	130
3.3 随机过程表示法	133
3.3.1 随机过程:传统表示法	133
3.3.2 随机过程样本函数的级数表示法	136
3.3.3 高斯过程	139
3.4 齐次积分方程和特征函数	142

3.4.1	有理谱	142
3.4.2	限带谱	146
3.4.3	非平稳过程	148
3.4.4	白噪声过程	149
3.4.5	最佳线性滤波器	151
3.4.6	特征函数和特征值的性质	155
3.5	周期过程	159
3.6	无限时间区间:频谱分解	161
3.6.1	频谱分解	161
3.6.2	频谱分解的应用:高斯过程的最大后验概率估计	165
3.7	矢量随机过程	167
3.8	小结	170
3.9	习题	171
	参考文献	180
第4章	信号检测和信号参数估计	182
4.1	引言	182
4.1.1	模型	182
4.1.2	内容编排	186
4.2	白高斯噪声中信号的检测和估计	187
4.2.1	附加白高斯噪声中信号的检测	187
4.2.2	线性估计	204
4.2.3	非线性估计	206
4.2.4	小结:白高斯噪声中的已知信号	216
4.3	非白高斯噪声中信号的检测和估计	217
4.3.1	“白化”方法	219
4.3.2	应用卡亨南-洛维展开直接推导	224
4.3.3	用充分统计量直接推导	226
4.3.4	检测性能	227
4.3.5	估计	231
4.3.6	积分方程的解法	233
4.3.7	灵敏度	246
4.3.8	已知线性信道	250
4.4	具有多余参数的信号:复合假设问题	251
4.4.1	随机相角	252
4.4.2	随机振幅和相位	264
4.5	多信道	276
4.5.1	公式	276
4.5.2	应用	278
4.6	多参数估计	279

4.6.1	附加白高斯噪声信道	279
4.6.2	推广	282
4.7	小结和省略	282
4.7.1	小结	282
4.7.2	略去的课题	284
4.8	习题	284
	参考文献	318
第5章	连续波估计	322
5.1	引言	322
5.2	估计器方程的推导	324
5.2.1	无记忆调制系统	324
5.2.2	有记忆的调制系统	329
5.3	均方估计误差的下界	332
5.4	多维波形估计	339
5.4.1	多维问题举例	340
5.4.2	建立数学模型	342
5.4.3	推导估计器方程	343
5.4.4	误差矩阵的下界	345
5.4.5	有色噪声估计	345
5.5	非随机波形的估计	347
5.6	小结	349
5.7	习题	350
	参考文献	354
第6章	线性估计	355
6.1	最佳处理器的性质	355
6.2	可实现线性滤波器:平稳过程;无限过去;维纳滤波器	365
6.2.1	维纳-何甫方程的解	365
6.2.2	最佳系统的误差	374
6.2.3	不可实现的滤波器	375
6.2.4	闭型误差表示式	377
6.2.5	最佳反馈系统	385
6.2.6	评论	387
6.3	卡尔曼-布西滤波器	390
6.3.1	线性系统的微分方程描述法与随机过程的产生	390
6.3.2	推导估计方程	407
6.3.3	应用	413
6.3.4	推广	429
6.4	线性调制:通信领域	436

6.4.1	双边带调幅:可实现解调	437
6.4.2	双边带调幅:延迟解调	438
6.4.3	调幅:广义载频	440
6.4.4	调幅:单边带-抑制载频	440
6.5	最佳线性滤波器的基本作用	442
6.6	解说	443
6.7	习题	444
	参考文献	471
第7章	讨论	474
7.1	总结	474
7.2	第 II、III 卷和阵处理内容预告	475
7.3	尚未研究的问题	476
	参考文献	477
术语汇编	481
规定	481
缩写	482
符号	482