



经典译丛

WILEY

信息与通信技术

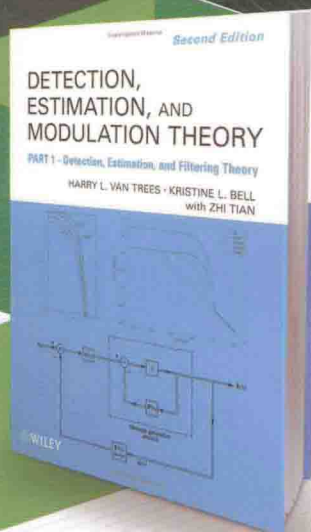
检测、估计和调制理论 ——卷I: 检测、估计和滤波理论 (第2版)

Detection, Estimation and Modulation Theory
Part I — Detection, Estimation and Filtering Theory
Second Edition

【美】 Harry L. Van Trees, Kristine L. Bell 著
Zhi Tian

孙进平 王 俊 高 飞 张旭旺 译
毛士艺 审校

Detection, Estimation and Modulation Theory
Part I — Detection, Estimation and Filtering Theory
Second Edition



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

经典译丛·信息与通信技术

检测、估计和调制理论

卷 I：检测、估计和滤波理论

(第2版)

Detection, Estimation and Modulation Theory

Part I—Detection, Estimation and Filtering Theory

Second Edition

[美] Harry L. Van Trees, Kristine L. Bell 著
Zhi Tian

孙进平 王 俊 高 飞 张旭旺 译

毛士艺 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

《检测、估计和调制理论》第1版的卷I长期以来得到了广泛使用,本书在第1版的基础上做了很大的扩展,可分为四部分:经典检测与估计理论、随机过程的表示、信号检测及信号参数估计、以及随机过程的线性估计。全书对随机与非随机信号的检测、估计及滤波理论进行了全面且深入的论述,同时以大量连续和离散形式的示例说明了理论结果的应用方法。本书包含了全局贝叶斯界、高效迭代算法、等效估计、序贯估计和重要性采样等重要主题,也包含了对非高斯过程贝叶斯估计的介绍,以及可以用维纳滤波器或卡尔曼滤波器实现的连续时间和离散时间随机过程最佳检测器,此外还增加了大量有关仿真实现的 MATLAB 应用方法。

本书适于作为电子信息类专业统计信号处理课程的研究生教材或教学参考书,也可供通信、雷达、声呐、信息理论与信息处理等领域的教学、科研和工程技术人员参考。

Detection Estimation and Modulation Theory: Part I—Detection, Estimation and Filtering Theory, Second Edition, ISBN 978-0-470-54296-5, Harry L. Van Trees, Kristine L. Bell with Zhi Tian

Copyright © 2013 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation published under license.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

本书中文简体中文字版专有翻译出版权由美国 John Wiley & Sons, Inc. 公司授予电子工业出版社。未经许可,不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2014-2938

图书在版编目(CIP)数据

检测、估计和调制理论. 1, 检测、估计和滤波理论/(美)范特里斯(Van Trees, J. L.)等著;孙进平等译.—2版. 北京:电子工业出版社,2015.1

书名原文: Detection, Estimation and Modulation Theory: Part I—Detection, Estimation and Filtering Theory, Second Edition 经典译丛·信息与通信技术

ISBN 978-7-121-24739-2

I. ①检… II. ①范… ②孙… III. ①信号检测-高等学校-教材 ②参数估计-高等学校-教材 ③线性调制-高等学校-教材 IV. ①TN911.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 262288 号

策划编辑:竺南直

责任编辑:竺南直

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

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:54 字数:1450 千字

版 次:2007 年 3 月第 1 版

2015 年 1 月第 2 版

印 次:2015 年 1 月第 1 次印刷

定 价:129.00 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 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

中译本序

20 世纪五六十年代是通信和雷达理论发展的黄金时代,由当时众多杰出应用数学家所奠定的通信与信息处理基础理论,至今仍然起着重要的作用。检测、估计和调制理论是其中在应用上最有活力和影响的基础理论和方法。1968 年 Van Trees 的“检测、估计和调制理论”第 1 版的卷 I 是一本将信息和数理统计的数学方法,以高度系统详尽的方式,结合物理系统介绍给电气工程界的科学工作者、工程师和研究生,使他们在当时对许多难以理解的内容在这本著作中也能得到透彻的理解。第 1 版自问世以来在全球各大学、通信和信号处理界产生过巨大的影响,作者本人曾在欧洲多所大学和研究机构讲学。第 1 版曾印刷了 28 次,是这一领域中最受关注的研究生教材和参考书之一。

毫无疑问,46 年间在这一领域发生了巨大的变化,作者本人的学术生涯也有较大的变化。除了从事学术研究之外,他还在美国国防部、美国空军担任过高级技术顾问、首席科学家,在通信公司中担任政府合作业务部门的负责人。这些经历使作者更善于从更广泛的范围凝练最重要和有意义的技术进步点,总结满足新的实际需求的重要研究成果,为迟来的第 2 版注入更丰富、重要的内容。作者在第 2 版的序言中,以详细的新旧版对比叙述了新版的框架和内容,尽管基本理论保持不变,但增添了许多新的结果。

新版大幅度扩充了第 1 版中检测和估计的基本理论,并使其更方便地应用于系统最佳处理的实现和性能评估。第 1 版第 2 章中许多小节的内容在新版中都以整章的篇幅加以描述。第 1 版中的高斯检测一节在新版中扩充到整个第 3 章,推导了多种高斯分布特征条件下最佳检测的数学表示式、结构形式和对应的性能边界公式,为新版后续章节中将检测理论顺利应用到通信、雷达和声呐系统奠定了基础。

第 1 版第 2 章中原来不到 10 页的仅适用于大信噪比时的参数估计的克拉美-罗界,在新版中扩充到了几乎占整个第 4 章和大部分第 5 章的内容。增添了频率和相位等非线性估计在低信噪比时发生的性能恶化的门限现象,指出了克拉美-罗和贝叶斯克拉美-罗界的应用限制,推导了更一般形式的全局贝叶斯界,以精确预测在小误差区、模糊区和数据无效区等全程的估计性能。估计的性能边界是评价估计能力时最受关注的问题,新版从理论、物理概念、实例和仿真实验上均给予了详细、清晰的描述。新版在经典检测理论中增添了重要性采样分析。当许多实际问题中无法获得解析解的时候,重要性采样提供了一种以小样本获得相同置信度的蒙特卡罗实验结果的基础。新版第 9 章是新加的,与连续随机过程并行的离散随机过程估计,但叙述是独立和完整的。从离散时间序列模型开始推导离散维纳滤波器,详细讨论了应用中的可实现与不可实现、模型灵敏度与计算复杂性、性能边界等问题。新版第 10 章也是新加的,研究了一种实际中常遇到的信号未知时的高斯随机过程的检测问题,得到了包含最佳滤波的最佳检测结构形式,充实了通常的检测问题。

新版适应了新时代信号处理发展的步伐,增添的内容在篇幅上几乎扩大了 50%,是一本相当彻底的修订版,也是一本 1150 页(中文版为 860 页)的宏篇巨著。

麻省理工学院 A. Baggeroer 教授认为第 1 版曾是两代从事实际系统信号处理设计的研究人员和学生的教材,新版将会是今后从事最佳信号处理的几代人的教材和参考文献。新版研究的问题

正是我国当前从事雷达、通信和声呐界的研究人员、工程师和研究生所面对的问题,愿他们能从阅读新版中受益。

北京航空航天大学自1980年以来一直以第1版作为讲授检测和估计理论研究生课程的教材。20世纪80年代曾翻译了“检测、估计与调制理论”第1版的卷I、卷II和卷III。本书的翻译工作由北京航空航天大学的孙进平、王俊、高飞和张旭旺完成,王欢、张焜、马飞、张芳芳、孙忠胜、袁常顺、毕严先参与了文档整理工作。孙进平、张旭旺完成了本书的校译工作。毛士艺对全书进行了终稿审定。为了保持与原版图书的一致性,本书中文版的一部分字符及字体保留了英文原版的写作风格,同时对原版进行了必要的勘误和修订。鉴于译者的经验和时间约束,翻译过程中难免存在未尽和疏漏之处,敬请广大读者批评指正。

新版的翻译部分地参考了第1版的译稿,译者衷心感谢参与第1版翻译的各位老师,同时感谢电子工业出版社竺南直博士为翻译工作所提供的大力支持。

毛士艺

2014年10月于北京航空航天大学

序 言

为了让读者了解原始工作的来龙去脉，我们在这一版中加入了第 1 版的序言。对于那些不熟悉“检测、估计和调制理论(DEMT)”第 I 卷的读者，有必要先读一读它。

DEMT 第 I 卷出版于 1968 年。事实证明，这是一本非常成功的书，几代工程师广泛使用了它。这本书总共印刷了 28 次，最后一次是在 1996 年。第 II 卷和第 III 卷在 1971 年出版，主题是关于特定应用领域的，比如模拟调制、高斯信号和噪声以及雷达/声呐问题等。由于模拟调制向数字调制的快速发展，第 II 卷使用的时间比较短。第 III 卷则至今仍被广泛用作参考书和补充教材。2002 年，第 IV 卷“最佳阵列处理”出版，同时也再版了第 I、II 和 III 卷的平装本。2007 年，为了详细阐述在第 I 卷至 IV 卷中起着重要作用的性能边界问题，Kristine Bell 博士和我编纂了《参数估计和非线性滤波/跟踪中的贝叶斯界》一书。

在第 I 卷出版以来的 44 年时间里，这一领域发生了许多变化：

1. 基本的检测和估计理论没有变化，但是出现了许多新结论。
2. 计算能力的指数式增长使我们能够实现那些在 1968 年时认为只有理论价值的算法。这些检测和估计理论方面的结论被应用到了实际的处理系统中。
3. 在系统设计和分析、研究以及教学方面，仿真技术得到了更广泛的应用。
4. MATLAB 成为了一种必备的工具。

如果我一直待在麻省理工学院并且持续在这一领域的工作，估计大概每隔 10 年就会出一个新版本，以体现这一领域的发展，因此这一版也许已是第五版了。

简单介绍一下我的职业生涯也许有助于解释为什么两版之间会间隔这么长时间。1972 年，麻省理工学院把我借调到华盛顿特区的国防部通信局。在那里，我担任了 3 年首席科学家和技术副主任。任期结束后，出于个人原因，我决定继续待在华盛顿特区。接下来的 3 年时间，我在 Comsat 担任助理副总裁。在那里，我领导的研究小组为 INTELSAT 卫星做前期方案设计。1978 年，我担任了美国空军的首席科学家。1979 年，Gerald Dinneen 博士，林肯实验室的前主任，当时是国防部负责 C3I (Command, Control, Communication, and Intelligence) 的部长助理。他邀请我担任他的首席帮办，我在那个位置上待了两年时间。1981 年，我加入了 M/A-COM Linkabit。Irwin Jacobs 和 Andrew Viterbi 在 1969 年创办了这家公司，并于 1979 年卖给了 M/A-COM。我建立了公司在东部的运营中心，3 年时间里发展到了大概 200 人的规模。Irwin 和 Andy 离开 M/A-COM 并创办 Qualcomm 之后，我负责在圣地亚哥和华盛顿特区的政府合作事宜。1988 年，M/A-COM 卖掉了这个分部。那时，我决定回归学术界。

1988 年 9 月份，我到了乔治梅森大学(GMU)。当时优先考虑的一件事是重启我在检测和估计领域的研究并完成最佳阵列处理这本书。然而，我发现需要成立一个研究中心，以吸引年轻的研究型教员和博士研究生。Bell 博士是我第一批学生中的一名，曾在 M/A-COM 工作过。她在 1990 年开始读博士，并于 1995 年毕业，之后在乔治梅森大学统计学系担任教职。建立和发展研究中心用了我大概 6 年时间。这个 C3I 方面的卓越研究中心非常成功，已经获得了超过 3000 万美元的研究经费。在该研究中心的成长阶段，我花了一些时间做研究，但是不可能很专心。

2005 年从教学和 C3I 中心主任的岗位退休之后，我可以全身心致力于咨询和写作上了。

2007年《贝叶斯界》这本书出版之后,考虑到下述诸多因素,我和 Bell 博士开始致力于编写第 I 卷的第 2 版。

1. 第 1 版诞生在一个被称为“通信理论黄金时代”的年代里。Norbert Wiener、Claude Shannon 和 Y. W. Lee 还在麻省理工学院任教,而许多这一领域未来的领导人物当时还只是研究生。检测和估计理论在当时是一个令人兴奋的新研究领域。如今已经演变成一个成熟的学科,并被应用在许多领域中。
2. 这本书的读者发生了变化。第 1 版的写作主要是用于我在麻省理工学院开设的课程。该课程一般有 40 至 50 名研究生选听。由于他们当中的许多人打算在这一领域开展研究,这就允许我省去一些推导的细节,并将新的推导结合在习题中(最好的例子是作为第 2 章习题的离散时间 Kalman 滤波器的推导)。为了使第 2 版对更多的读者更具可读性,我们在许多方面进行了更详细的解释。
3. 这一领域有大量新的研究成果。我们挑选了那些最适合纳入导论型教科书的成果。
4. 第 1 版尽可能地强调了闭型解析解。第 2 版保持了这种风格,但也加入了迭代解、仿真和大量 MATLAB 应用。

第 2 版具有以下一些新的特色:

1. 在第 2 版里,第 1 版第 2 章被扩展成了第 2 章至第 5 章。新版的第 2 章研究经典检测理论(第 1 版的第 2.1~2.3 节和第 2.7 节),并且增加了一节关于重要性采样的内容。新增加的这一节是性能边界部分倾斜密度问题的一个合理延伸。第 3 章,“高斯检测”,是对第 1 版第 2.6 节的显著扩展,并且推导了许多明确的结论。这些结论将会在本书的后续章节用到。第 4 章,“经典参数估计”,是对第 1 版第 2.4 节和 2.5 节的显著扩展。这一章介绍了一些新的主题,并且基于《贝叶斯界》一书的引论内容,加入了全局贝叶斯界的详细推导。第 5 章“一般高斯估计”是新内容,该章介绍了 Fisher 线性高斯模型和贝叶斯线性高斯模型,讨论了计算实现算法、等价估计算法(ML、最小二乘法、MVDR)、灵敏度和失配,以及序贯估计。
2. 第 2 版的第 6、7 和 8 章对应于第 1 版的第 3、4 和 6 章。前者相对于后者有少量变化,但两者的基本内容是一样的。
3. 第 9 章“离散时间随机过程的线性估计”是新增章节。这一章讨论了离散时间 Wiener 滤波器和离散时间 Kalman 滤波器。此外,为了导出不同的算法,这一章还讨论了在这些算法的数值求解过程中可能出现的各种问题,以及避免这些问题和降低计算复杂度的技术。
4. 第 10 章“高斯信号检测”处理连续时间过程和离散时间过程。关于连续时间过程的讨论取自于 DGMT 第 III 卷的第 2 章和第 4 章。关于离散时间过程的讨论被分成了块处理和序贯处理两部分。对于块处理,我们将提供表格来说明在第 3 章至第 5 章中已经解决了这个问题。对于序贯处理,我们将说明如何从 FIR 维纳滤波器或离散时间 Kalman 滤波器的输出中得到检测统计量。

对于已经熟悉了 DGMT 第 I 卷或者其他检测理论或估计理论教科书的读者,通过浏览第 11 章“结束语”来了解一下第 2 版的内容梗概是比较有用的。

滤波内容的大量增加以及调制理论章节的删减促使我们为第 I 卷增加了副标题“检测、估计和滤波理论”。

从对专业基础知识的要求来看,本书不需要太多高深的基础知识。当然,初等概率论和随机过程方面的知识应已深入掌握,尤其要很熟悉随机过程的二阶矩特征和高斯随机过程。读者也

需要熟悉矩阵和掌握特征空间等内容。在后面的章节中，了解状态变量的表示方法是很有用的。我们对不同类型学员的教学经验表明，许多学生能够理解检测和估计理论的基本结论，但是在具体实现时又有很多困惑。这主要是因为随机过程和/或矩阵理论知识的匮乏。本书的数学严谨程度适中，不过大多数章节的结论，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结果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结果的能力，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对应的结果。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结果。

需要强调读者求解习题对深入理解书中内容的必要性。贯穿本书课程，我们始终强调培养解决问题的能力。每一章末尾的习题既有常规题目，又有本书内容的重要扩展。只有进行相当数量的练习，才能领会到结论的重要性和普适性。读者可以来函索取答案手册(email: demt2013@gmail.com)。该手册给出了本书大约 25% 习题的答案，此外还包含了第 2 版中新加图例的 MATLAB 程序。

在写作过程中，本书的作者发生了变化。最初的计划是我和 Bell 博士作为整本书的合著者。2009 年 Bell 博士离开乔治梅森大学去 Metron 后，按约定她将继续负责完成前五章，而我则继续负责编写剩下的六章。然而，我只独立完成了第 6 章至第 8 章、第 10 章和第 11 章。为了完成第 9 章，我邀请 Zhi Tian 博士作为这一章的共同执笔人。Zhi Tian 博士曾经在乔治梅森大学读博士，现在是密歇根理工大学 ECE 系的教授。说明合著者的贡献是必要的。他们高超的分析能力和数学技巧，以及熟练运用 MATLAB 的能力，对完成本书是必不可少的。此外，Bell 博士也完成了两个附录，并认真校对了全书。在此，对他们的贡献表示由衷的感谢。

对手稿进行排版是一项充满挑战的任务，因为第 1 版出版的时候 LaTeX 尚未出现。AFCEA 的 Norma Corrales 和 Fred Rainbow 以及乔治梅森大学 C4I 中心的现任主任 Mark Pullen 教授为此提供了一些资金支持。三名研究生：Seyed Rizi、Awais Khawar 和 Khalid Al-Muhanna 将手稿整理成了 LaTeX 格式。他们为此投入了大量时间，尽管这些内容并不在他们的研究领域之内。Seyed Rizi 管理了整个过程，他对本书的贡献应当得到特别的致谢。Vibhu Dubey 和他在 Thomson Digital 的同事对本书的最终稿做了非常出色的排版工作。

Harry L. Van Trees

第 1 版序

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,勒让德和高斯曾经发表过这方面的著作。三十多年前,费什尔、奈曼和皮尔逊对作为本书基础的经典检测理论做出了重要贡献。1941 年和 1942 年,柯尔莫哥洛夫和维纳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概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中。总体来说,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員阅读。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。总体来说，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。

许多人以不同方式为本书做出了贡献，在此向他们表示由衷的感谢。W. B. Davenport 教授和 W. M. Siebert 教授一直鼓励本书的写作，并为书中各章提供了技术性建议。麻省理工学院的同事 Estil Hoversten 教授和 Donald Snyder 教授以及我的三名博士生 Lewis Collins、Arthur Baggeroer 和 Michael Austin 认真评阅了各个章节，他们的建议显著提高了手稿的质量。此外，Baggeroer 和 Collins 为各章贡献了部分习题，而且 Baggeroer 还为绘制书中的很多图形结果编写了必要的程序。David Wright 少尉评阅了第 2 章。我的两位助教 L. A. Frasco 和 H. D. Goldfein 整理了本书的全部习题。林肯实验室的 Howard Yudkin 博士阅读了全部手稿并提出了一些重要的修改建议。此外，许多选修这门课程的研究生也提出了一些值得采纳的建议。最终稿大部分是由 Aina Sils 小姐打印的，衷心感谢她对待手稿多次改动的耐心。其他几位秘书，包括 Jarmila Hrbek 夫人、Joan Bauer 夫人和 Camille Tortorici 小姐，也打印了部分书稿。

如前所提，本书是我自己研究兴趣的一个产物。这些研究还在持续进行，并且我非常高兴能够在正常互惠的基础上把当前的研究成果分享给那些工作在这一领域的人们。林肯实验室资助了我在调制理论方面的早期工作，那时我在 Herbert Sherman 博士和 Barney Reiffen 博士领导的研究团队里担任临时雇员兼顾问。在电子研究实验室的主持下，Joint Services 和美国国家航空航天局资助了我在麻省理工学院的部分研究。在此对这些资助表示由衷的感谢。

H. L. Van Trees

1967 年 10 月于马萨诸塞州剑桥

参考资料

- [1] Thomas Bayes, "An Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances," *Phil. Trans*, **53**, 370-418 (1764).
- [2] A. M. Legendre, *Nouvells Méthods 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.

精英书苑

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 导论	1
1.1 引言	1
1.2 主题提要	1
1.3 可能的方法	7
1.4 编排方式	10
第 2 章 经典检测理论	12
2.1 引言	12
2.2 简单二元假设检验	14
2.3 M 元假设	36
2.4 性能边界与近似式	45
2.5 蒙特卡罗仿真	57
2.6 总结	79
2.7 习题	81
第 3 章 一般高斯检测	91
3.1 高斯随机矢量的检测	91
3.2 等协方差矩阵	100
3.3 等均值矢量	126
3.4 一般高斯	143
3.5 M 元假设	153
3.6 总结	155
3.7 习题	157
第 4 章 经典参数估计	168
4.1 引言	168
4.2 标量参数估计	169
4.3 多参数估计	216
4.4 全局贝叶斯界	246
4.5 复合假设	259
4.6 总结	281
4.7 习题	282
第 5 章 一般高斯估计	298
5.1 引言	298
5.2 非随机参数	299
5.3 随机参数	363
5.4 序贯估计	372

5.5	总结	381
5.6	习题	383
第 6 章	随机过程的表示法	389
6.1	引言	389
6.2	确定性信号的归一化正交展开	390
6.3	随机过程表示法	395
6.4	齐次积分方程与特征函数	404
6.5	矢量随机过程	421
6.6	总结	424
6.7	习题	425
第 7 章	信号检测和信号参数估计	436
7.1	引言	436
7.2	白高斯噪声中信号的检测与估计	440
7.3	非白高斯噪声中信号的检测与估计	467
7.4	具有多余参数的信号: 复合假设问题	501
7.5	多信道	528
7.6	多参数估计	531
7.7	总结	535
7.8	习题	536
第 8 章	连续时间随机过程的估计	569
8.1	最佳线性处理器	569
8.2	可实现线性滤波器: 平稳过程; 无限过去: 维纳滤波器	580
8.3	高斯-马尔可夫过程: Kalman 滤波器	595
8.4	非高斯模型的贝叶斯估计	621
8.5	总结	628
8.6	习题	630
第 9 章	离散时间随机过程估计	647
9.1	引言	647
9.2	离散时间维纳滤波器	648
9.3	离散时间 Kalman 滤波器	676
9.4	总结	750
9.5	习题	750
第 10 章	高斯信号检测	760
10.1	引言	760
10.2	连续时间高斯过程检测	760
10.3	离散时间高斯过程检测	786
10.4	总结	793
10.5	习题	794

第 11 章 结束语	799
11.1 经典检测和估计理论	799
11.2 随机过程的表示	806
11.3 信号检测和信号参数估计	807
11.4 随机过程的线性估计	809
11.5 关注要点	814
11.6 结语	815
附录 A 概率分布与数学函数	816
附录 B 例子索引	826
参考文献	831

第1章 导论

1.1 引言

本书是“检测、估计与调制理论”四卷系列中第 I 卷的第二版。它是原版第 1 卷 [Van68, Van01a] 的显著扩展,增加了第 1 版出版后 44 年里新出现的许多重要成果,对第 1 版中的许多主题进行了扩展,同时也加入了许多新的内容。此外,原版第 III 卷的一些内容也移到了本书中。

在本书中,我们将要研究统计理论的三个领域:检测理论、估计理论和滤波理论。目的是以共同的数学架构研究这些理论,并论证在许多不同的具体场合中怎样利用它们解决大量的实际问题。

在本章中,我们介绍三方面的内容提要。第一是主题提要,通过考察某些有关的典型问题,定性了解这三个领域的内容。第二是逻辑提要,探讨解决问题的不同方法。第三是按年代先后概要地阐述本书的结构。

1.2 主题提要

解释检测理论概念的一种简易方法,是考察一些导致检测理论问题的实际物理过程。

一个简单数字通信系统示于图 1.1。信源每隔 T 秒输出一个二进制数字。我们的目的是把这个数字序列传输到另一个地方。用于传输序列的信道取决于特定的情况。典型地,它可能是电话线路、无线链路或声信道。为说明方便,这里考虑无线链路。为了传送信息,必须把它变成适于在信道上传送的形式。一个简单的方法是建立这样一个装置。假定信源在 T 秒内产生一个“1”,那么该装置在 T 秒内产生一个正弦波

$$s_1(t) = \sin \omega_1 t \quad (1.1)$$

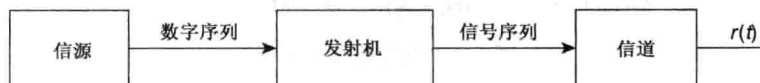


图 1.1 数字通信系统

假定信源在 T 秒内产生一个“0”,那么该装置在 T 秒内产生一个不同频率的正弦波

$$s_0(t) = \sin \omega_0 t \quad (1.2)$$

选择的频率要能够使信号 $s_0(t)$ 和 $s_1(t)$ 在特定的无线链路中传播。将此装置的输出馈送到天线并在信道中传输。图 1.2 示出了典型的信源和所传送的信号序列。

在最简单的一类信道中,信号序列到达接收天线时有衰减但基本上不畸变。为了处理接收信号,将其通过接收天线和若干级射频放大器。在上述传输过程中,热噪声 $n(t)$ 附加到消息序列上。于是,在任何 T 秒间隔内,我们可得下述波形:若传输 $s_1(t)$ 时,为

$$r(t) = s_1(t) + n(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (1.3)$$

若传输 $s_0(t)$ 时,为

$$r(t) = s_0(t) + n(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (1.4)$$

现在,我们面对着判定传输的是两个可能的信号中哪一个的问题。我们把完成这一过程的装置称为判决装置。简单而言,就是由观测 $r(t)$ 按某一组准则推测发送的是 $s_1(t)$ 还是 $s_0(t)$ 的处理器,等效于推测信源在上一个时间间隔里的输出。我们把设计和评估该处理器的问题称为检测理论问题。在这种特定情况下,做出判决时唯一可能的误差源是附加的噪声。若不存在噪声,则输入是完全已知的,并可以无误差地做出判决。我们把这类问题称为噪声中已知信号的检测问题,它相当于我们所研究的最低级(即最简单的)的检测问题。

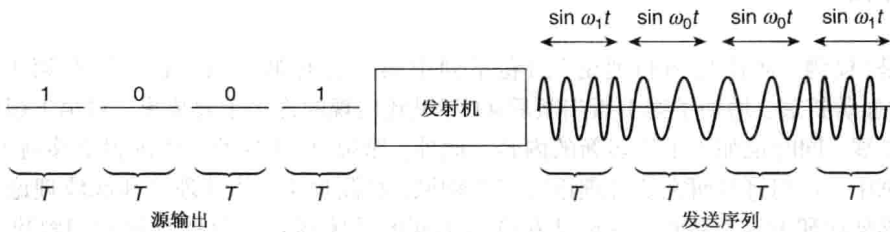


图 1.2 典型序列

第二级检测问题的示例如图 1.3 所示。用来产生上例中 $s_1(t)$ 和 $s_0(t)$ 的振荡器有一相移。因此,在特定的 T 秒间隔内,对应于“1”的接收信号为

$$r(t) = \sin(\omega_1 t + \theta_1) + n(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (1.5)$$

对应于“0”的接收信号为

$$r(t) = \sin(\omega_0 t + \theta_0) + n(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (1.6)$$

式中 θ_0 和 θ_1 是未知的恒定相角。于是,即使在无噪声时,输入波形也不是完全已知的。在实际系统中,接收机可以具有测量振荡器相位的辅助装置。假如相位变化足够缓慢,我们会看到精确测量基本上是可能的。若果真如此,这个问题就和前述的一样。然而,如果测量并不精确,那么我们必须要在模型中计入信号的不定性。

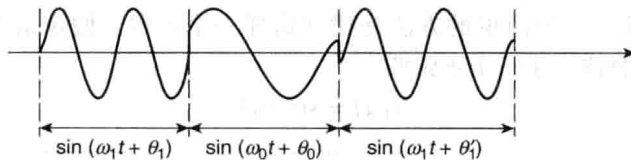


图 1.3 具有相移的序列

在雷达和声呐领域中也有相应的问题。普通雷达发射一个具有矩形包络的,频率为 ω_c 的脉冲:

$$s_r(t) = \sin \omega_c t, \quad 0 \leq t \leq T \quad (1.7)$$

假如目标存在,脉冲被反射回来,即使最简单的目标,在传输的信号上也会引入衰减和相移。于是,在所考虑的时间间隔中,用于进行处理的信号为:若目标存在

$$\begin{aligned} r(t) &= V_r \sin[\omega_c(t - \tau) + \theta_r] + n(t), & \tau \leq t \leq \tau + T \\ &= n(t), & 0 \leq t < \tau, \tau + T < t < \infty \end{aligned} \quad (1.8)$$

若目标不存在

$$r(t) = n(t), \quad 0 \leq t < \infty \quad (1.9)$$

可以看出,噪声不存在时,信号仍然包含着三个未知量:振幅 V_r 、相位 θ_r 和到目标的往返时间 τ 。

这两个例子代表了第二级检测问题。我们将其归类为噪声中具有未知参数的信号检测问题。

第三级检测问题出现在诸多领域。在无源声呐检测系统中,接收机侦听由敌舰产生的噪声。