



信息技术和电气工程学科国际知名教材 中译本 系列



最优阵列处理技术

Optimum Array Processing
Part IV of Detection, Estimation,
and Modulation Theory

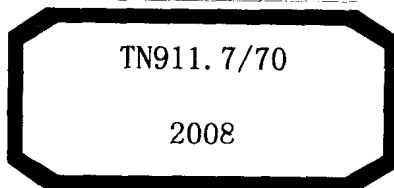
Harry L. Van Trees 著
汤俊 等 译



清华大学出版社



信息技术和电气工程学科国际知名教材 **中译本** 系列



TN911.7/70

2008

最优阵列处理技术

Optimum Array Processing
Part IV of Detection, Estimation,
and Modulation Theory

Harry L. Van Trees 著
汤俊 等 译

清华大学出版社
北京

Harry L. Van Trees

Optimum Array Processing. Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory
EISBN: 0-471-09390-4

Copyright © 2002 by John Wiley & Sons, Inc., New York, All Rights Reserved.

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

本书中文简体字翻译版由 John Wiley & Sons 公司授权清华大学出版社在全球范围内独家出版发行。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。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2003-8059

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

最优阵列处理技术/(美)第斯(Trees, H. L. V.)著;汤俊等译. —北京:清华大学出版社, 2008.1

(信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列)

书名原文: Optimum Array Processing. Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part IV
ISBN 978-7-302-14760-2

I. 最… II. ①第… ②汤… III. ①信号处理-教材 ②随机过程-教材 IV. ①TN911.7
②O211.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第027946号

责任编辑: 邹开颜 王敏稚 李 晔

责任校对: 时翠兰

责任印制: 李红英

出版发行: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦A座

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

邮 编: 100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社 总 机: 010-62770175

邮购热线: 010-62786544

投稿咨询: 010-62772015

客户服务: 010-62776969

印 刷 者: 清华大学印刷厂

装 订 者: 三河市金元印装有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印 张: 68.75 字 数: 1672千字

版 次: 2008年1月第1版 印 次: 2008年1月第1次印刷

印 数: 1~2000

定 价: 120.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号: 008922-01

《信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列》

出版说明

2000年10月,为了系统地参考和借鉴国外知名相关大学教材,推进我国大学的课程改革和我国大学教学的国际化进程,清华大学出版社策划、出版了《国际知名大学原版教材——信息技术学科与电气工程学科系列》,至今已经出版了30多种,深受高等院校信息技术与电气工程及相关学科师生和其他科技人员的欢迎和好评,在学术界和教育界产生了积极的影响。现在这个系列中的大部分教材都已经重印,并曾获得《2001年引进版优秀畅销丛书奖》。在此期间,我们曾收到来自各地高校师生的很多反映,期望我们选择这个系列中的一些较为基础性和较为前沿性的教材译成中译本出版,以便为更广大的院校师生和科技人员所选用。正是基于这种背景和考虑,清华大学出版社决定进一步推出《信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列》。

这套国际知名教材中译本系列所选书目的范围,限于信息技术和电气工程学科所属各专业的技术基础课和主要专业课。教材原版本除了选自《国际知名大学原版教材——信息技术学科与电气工程学科系列》外,还将精选其他具有较大影响的国外知名的相关领域教材或教学参考书。教材内容适于作为我国普通高等院校相应课程的教材或主要教学参考书。

本国际知名教材中译本系列按分期分批的方式组织出版。为了便于使用这套国际知名教材中译本教材系列的相关师生和科技人员从学科和教学的角度,对其在体系和内容上的特点和特色有所了解,在每种中译本教材中都附有我们约请的相关领域资深教授撰写的推荐说明,其中的一些直接取自于《国际知名大学原版教材——信息技术学科与电气工程学科系列》中的影印版序。

本国际知名教材中译本系列的读者对象为信息技术和电气工程学科所属各专业的本科生或研究生,同时兼顾其他工程学科专业的本科生或研究生。既可采用作为相应课程的教材,也可作为相应课程的教学参考书。此外,本国际知名教材中译本系列也可提供作为工作于各个技术领域的工程师和技术人员的自学读物。

感谢使用本国际知名教材中译本系列的广大师生和科技人员的支持。期望广大读者提出意见和建议。

郑大钟 教授
清华大学信息科学技术学院

译者序

阵列信号处理是近 30 年以来迅速发展中的一个领域，在雷达、声纳、通信、电子对抗、地震信号处理、语音信号处理、射电天文等领域得到了广泛应用，并逐渐成为众多应用领域中的核心技术和主要发展方向——如雷达中的相控阵技术、通信中的智能天线阵列技术、电子对抗中的超分辨率测向技术以及语音信号处理中的麦克风阵列技术等。阵列信号处理一直是理论、算法研究的学者和进行实际应用开发的工程师所关注的最重要的研究内容。

尽管阵列信号处理的应用范围如此之广、应用价值如此之大，但在这个领域内好的指导性教材却为数不多。比较经典的一些书籍，如英国 J. E. Hudson 教授所著的 *Adaptive Array Principles* 和美国 P. A. Monzingo 和 T. W. Miller 所著的 *Introduction to Adaptive Arrays* 尽管在国内已有中译本，但是由于成书较早（均在 20 世纪 80 年代出版），不能反映出该领域在近十几年内的发展。在 20 世纪 90 年代以后出版的由美国的 D. H. Johnson 和 D. E. Dudgeon 教授所著的 *Array Signal Processing, Concepts and Techniques* 以及德国的 R. Klemm 博士所著的 *Space-time Adaptive Processing* 在内容上对读者的起点要求较高，专业背景比较强。因此，对于国内众多想涉足这个领域的研究者和学生来说，如何建立起阵列信号处理研究领域内知识结构的整体框架，以及如何把握整个领域发展的主要脉络，一直是一个比较困难的问题，往往只能从几篇参考文献入手来摸索某个研究方向的发展，一般来说比较困难而且整个过程时间比较长。

本书作者 Harry L. Van Trees 教授于 20 世纪 60 年代在 MIT 担任助理教授时就开始了对阵列信号处理的相关研究工作。他在完成了经典的 *Detection, Estimation, and Modulation Theory* (I, II, III) 系列专著的撰写后，一度计划开始本书的撰写工作。但是由于各种原因（作者在原序中介绍了其中的一些原委），这本书在 30 年以后（2002 年）才与读者见面。我想这个过程虽然有些漫长，但对于今天能够拜读此书的读者来说，反倒是一个幸事。这个过程一方面为本书增添了一种传奇色彩，另一方面也为本书在内容上的丰富和完整提供了条件。

本书的内容非常丰富，既包含了经典的阵列设计和空时随机过程分析的理论，也包含了近十年来在自适应阵列处理领域内自适应波束形成、波达方向估计（DOA）和空间谱估计方面的各种新的理论、算法和技术。同时作者也结合了多年的教学和撰写教材的经验，在内容上做到了结构完整、脉络清晰。尤为重要的是，作者在每一章后面都为读者精心提供

了很多习题。这些习题一方面可以帮助读者加强对基本概念的理解，另一方面也可以帮助读者开拓视野，了解相关问题的进一步研究方向。

总的来说，由于作者擅长从纷繁复杂的现象中抽取本质内容，并对艰深的理论问题进行深入浅出的介绍，所以本书是近年来在阵列信号处理领域内的一本非常优秀的著作，非常值得向有关研究人员、高年级本科生和研究生推荐。它既可以作为研究者的专业参考书籍，也可以作为教学用书和参考书，适用于雷达、通信、语音等很多领域内的读者。

本书由清华大学电子工程系高速信号处理与网络传输研究所高速信号处理实验室汤俊副教授统稿，并负责了译者序部分、第1章~第7章以及附录B和附录C的翻译工作，电子科技大学的万群教授负责了第8章~第10章和附录A的翻译工作。清华大学电子工程系高速信号处理与网络传输研究所的研究生顾晶、伍勇、李华、吉中智、李宁、李丹和杨阳为有关内容的翻译和公式的校对做了大量工作，北京大学的研究生王峥、张曦、李道兵为书中公式的录入提供了帮助。清华大学电子工程系的彭应宁教授对本书的翻译工作给予了很大的支持，清华大学出版社的工作人员为本书的版权引进和出版工作提供了有力的帮助和支持，在此对他们表示衷心的感谢！由于译者水平有限，对书中的一些技术术语难免把握不准，书中也可能会存在一些错误，敬请读者批评指正。

译者于2007年1月

作者原序

阵列处理在很多应用领域内具有重要的作用。很多现代雷达和声纳系统以天线阵列和水听器 (hydrophone) 阵列作为系统的主要组成部分。很多通信系统利用相控阵或多波束天线来实现高性能的处理。地震信号处理的阵列被广泛地用于石油勘探和地下核试验的监测。很多医疗诊断和治疗技术也采用了阵列。射电天文领域采用了极大规模的阵列来实现高分辨率。目前的第三代移动通信系统将利用自适应阵列处理来达到理想的系统容量。我们将在第 1 章中介绍阵列处理技术的各种应用。

我对最优阵列处理的研究兴趣从 1963 年开始, 当时我是 M.I.T. 的助理教授, 正和 Arthur D. Little 一起为美国海军研究一个声纳项目。我推导出了在高斯噪声环境下检测高斯平面波信号的最优处理器 [VT66a][VT66b]。后来, 我们发现 Bryn [Bry62] 在以前已经发表了这个结果 (参见 Vanderkulk [Van63])。由于我在检测、估计和调制理论的研究领域投入了更多的精力, 因此减少了在阵列处理方面的研究工作。

1968 年, 我出版了 *Detection, Estimation, and Modulation Theory* 的第一卷 ([VT68])。后来的情况表明这是一本非常成功的书, 被好几代工程师作为经典的参考书籍广泛使用。1971 年, 我出版了该系列书籍的第二卷和第三卷 ([VT71a]、[VT71b]), 这两本书重点放在了一些特定的应用领域, 如模拟调制、高斯信号和噪声以及雷达 - 声纳的问题。由于从模拟调制技术到数字调制技术的转化, 第二卷中内容的应用时间不是很长。但是, 第三卷仍然被研究者们广泛地用做参考书和补充文献。出于一种年轻时的理想主义思想, 我在第三卷的序言部分和第 14 章中都提到了, 我将在 1971 年出版另外一本篇幅较短的有关最优阵列处理的专著, 并在参考书目中把该书列了出来 (*Optimum Array Processing*, Wiley, 1971), 这本书后来也被其他几个作者所引用。没有发表的内容 [VT69] 中包含了大部分计划中的材料。更宽泛地说, 本书可以说是那本计划中专著的扩充。

在本书中, 多次引述了 *Detection, Estimation, and Modulation Theory* 的第一卷和第三卷。所参考的材料在其他几本书中也可以看到, 但是由于我对自己的工作是最熟悉的, 因此就直接引述了这几本书。Wiley 出版社已经重新出版了 *Detection, Estimation, and Modulation Theory* 的第一卷和第三卷 ([VT01a]、[VT01b]), 以便和本书的出版相呼应, 因此这些材料读者应该是可以得到的。

现在对我的职业生涯做一个简单的介绍, 可能有助于解释为什么这本书晚了 30 年才出

版。1972年, M.I.T. 把我借调到了位于 Washington, D.C. 的国防部通信局, 我在那里当了3年的首席科学家和技术顾问。在这个经历以后, 因为个人的一些原因, 我留在了 Washington, D.C.。我在 COMSAT 担任了助理副总裁, 我领导的研究小组主要是为 INTELSAT 卫星制定计划, 总共花了3年时间。1978年, 我成为美国空军的首席科学家。1979年, 林肯实验室的前任领导者 Gerald Dinneen 博士, 当时正是国防部 C³I 的助理部长, 他邀请我做他的首席代表, 我在这个位置上工作了两年的时间。1981年, 我加入了 M/A-COM Linkabi。Linkabi 是一家公司, 由 Irwin Jacobs 和 Andrew Viterbi 在 1969 年创办, 并在 1979 年卖给了 M/A-COM。我建立了一个东部的办事处, 最后在 3 年内发展到 200 人的规模。在 Irwin 和 Andy 离开 M/A-COM 并创办了 Qualcomm 以后, 我主要负责在 San Diego 和 Washington, D.C. 的办事处。1988 年, M/A-COM 卖掉了这个分部。从那时起, 我决定再回到学术界。

我在 1988 年到了 George Mason 大学。我的一个初衷是完成最优阵列处理这本书。但是, 后来我发现需要建立一个研究中心, 来吸引年轻的有志于研究的学者和博士生。这个过程大概花了 6 年的时间。现在的这个 C³I 中心是非常成功的, 目前已经产生了超过 3000 万美元的研究经费。在这个研究中心的成长期内, 我在阵列处理上花了一些时间, 但完全集中注意力是不太可能的。

在撰写有关最优阵列处理教材的过程中, 一个基本问题是, 在过去的 30 年里, 很多优秀的学者已经在阵列处理领域内取得了很多研究进展。同时, 计算机技术的发展也使得很多最优处理的算法可以得到实际应用。M.I.T. 的 Arthur Baggeroer 教授是声纳领域的一位杰出的学者, 做出了重要的贡献。Arthur 教授在 1969 年和我共同完成他的博士论文。我说服了 Arthur 教授来一起撰写这本最优阵列处理的书。我们联合制定了一个写作提纲。但是, 几年以后, 由于地理上的距离以及 Arthur 教授在其他一些学术圈内的重要作用, 我们发现联合来写这本书比较困难, 经商量后我们同意由我单独来完成这本书。尽管最后的提纲可能和原先的写作提纲只有 25% 的相关性, 但在考虑原先的提纲以及对一些结果进行评述时, Arthur 教授与我的合作对于本书的形成仍是非常重要的。

1995 年, 我利用一个学术休假年开始了第一稿的写作。我在 1996—1997 年利用第一稿开了一个研究生课程。在 1997—1998 学年中, 我采用了第二稿。在 1998—1999 年, Kristine Bell 教授采用了第三稿。这里不像在 M.I.T. 时的环境, 当时我的检测和估计理论课堂上的研究生规模都在 40~50 人左右, 而在这里, 每个课堂上的学生也就 8~10 个人。但是, 很多学生都在阵列处理领域内非常活跃地工作, 并提供了很多建设性的意见。

本书的目的是为学生和实际应用的工程师提供一个对最优阵列处理技术的系统而详尽的介绍。可以帮助学生开始在阵列处理领域开展研究工作, 也可以帮助他们实现实际的阵列处理系统。本书也对目前正在该领域研究的人有所帮助。我们假设读者具有概率论和随机过程的背景知识。同时, 我们假设读者对于 *Detection, Estimation, and Modulation Theory* 的第一卷 ([VT68], [VT01a]) 和第三卷 ([VT71b]、[VT01b]) 是非常熟悉的。对 [VT68] 和 [VT01a] 的首次引用出现在第 5 章中, 使得这本书可以和一个检测理论的课程同时讲授。我们也假设读者具有矩阵理论和线性代数的基础。本书需要读者具有解决问题的能力 and 利用 MATLAB[®] 进行编程的能力。

最终出来的书从原先计划的一个简短的专著变成一个内容很丰富的专著。我们的经验是, 如果学生具有合适的背景和学习能力, 我们可以在两个 15 周的学期里讲授完本书的内容。

为了使得这本书更加有用, Kristine Bell 教授建立了一个网站 <http://ite.gmu.edu/DetectionandEstimationTheory/>。这个网站包含了检测、估计和调制理论系列书籍的四卷书的相关材料。这个网站的最优阵列处理部分包括如下内容:

(1) 书中大多数图的 MATLAB[®] 程序。这些程序使得读者可以研究不同的信号和干扰环境下的情况, 有助于解决习题。缺点是一个学生可能会利用这些程序, 而不去独立地解决问题。我们希望一个认真的学生能够抵制这种诱惑。

(2) 一些演示程序使得读者可以看到参数变化对于波束方向图和算法输出的影响。后面章节的一些演示程序可以帮助读者来观察系统的自适应动态变化特性。这些演示程序的开发还正在进行中。

(3) 一个有关书中勘误表和补充材料将定期地在网站上更新。有关的错误和评述可以发送到 hlv@gmu.edu 或 kbell@gmu.edu。

(4) 很多习题的答案和我们采用的一些考试题目的答案, 包括相关的 MATLAB[®] 程序。这个部分是采用密码保护的。我们只提供给采用本书作为教材的老师。为了得到密码, 请发送请求到 hlv@gmu.edu 或 kbell@gmu.edu。

为了讲授这个课程, 我们制作了一个独立的 LATEX 文件, 其中只包含公式。通过 Ghostview, 可以得到只包含公式的视图。我们提供给采用本书作为教材的老师一张 CD, 其中包含这个文件, 请相关教师发送 e-mail 至 hlv@gmu.edu。

本书大量采用了很多研究者的研究成果。我们对他们的贡献表示了感谢。最后一章中的参考书目中包含了 2000 篇以上的参考文献。显然, 如果没有这些优秀的研究成果, 这本书的成书是不可能的。

很多人以各种方式为本书做出了贡献, 在这里很荣幸地对他们表示感谢。其中, George Mason 大学的信息技术和工程学院的前任主任 Andrew Sage 先生对本书的写作以及在建立 C³I 中心的工作中一直给予了重要的支持。现任主任 Lloyd Griffiths 先生对我的工作也非常支持。

在我课上的一些学生, 对书的各种初稿提出了很多建设性的意见, 并修正了很多错误。其中包括: Amin Jazaeri、Hung Lai、Brian Flanagan、Joseph Herman、John Uber、Richard Bliss、Mike Butler、Nirmal Warke、Robert Zarnich、Xiaolan Xu 和 Zhi Tian 采用的是我的第一稿; Geoff Street、Stan Pawlukiewicz、Newell Stacey、Norman Evans、Terry Antler 和 Xiaomin Lu 采用的是第二稿, 并在内容上做了大量的扩充; Roy Bethel、Paul Techau、Jamie Bergin、Hao Cheng 和 Xin Zhang 采用的是第三稿。最后的一稿是在 2000—2001 年的课程中采用的。John Hiemstra、Russ Jeffers、Simon Wood、Daniel Bray、Ben Shapo 和 Michael Hunter 提出了很多有用的建议和修正意见。尽管有了这个不断修正的过程, 书中仍然可能存在错误。请发现错误的读者发送修正意见到 hlv@gmu.edu, 我们将在网页上将这些修正意见贴出来。

两位访问教授 Shulin Yang 和 Chen-yang Yang 也听了课程, 并提出了一些建议。Shulin Yang 博士、Chen-yang Yang 和 Xin Zhang 小姐用 LATEX 完成了本书的编辑工作。Aynur Abdurazik 和 Muhammad Abdulla 完成了最后的 LATEX 版本。他们的工作能力和耐心是非凡的。Joshua Kennedy 和 Xiaomin Lu 绘制了书中的很多图。我的 4 个研究助手——Zhi Tian 小姐、Xiaolan Xu 小姐、Xiaomin Lu 先生和 Xin Zhang 小姐负责了各章中的例子的工作。

作。他们对本书的改进所做的工作是非常宝贵的。

我需要向 Kristine Bell 教授在此单独致谢。她在我和 Yariv Ephraim 教授的指导下完成了她在阵列处理领域内的博士论文，然后她继续和我一起为这本书工作了数年。她对书中材料的选择以及很多领域内新的研究工作做出了很多贡献。她在 1998—1999 年讲授了两学期的课程，并为本书的材料增加了很多内容。她建立的网站为本书增添了在教学上的重要价值。

一些同仁为我阅读了手稿，并提出了一些建议。这里包括很多阵列处理领域内杰出的学者。Dan Fuhrmann、Norman Owsley、Mats Viberg 和 Mos Kaveh 阅读了整本书，并提出了一些修改意见和建议。除此之外，他们还指出了一些我忽略的重要参考文献。Petre Stoica 对第 7 章～第 10 章的内容提出了非常好的评述，他的两个学生——Erik Larsson 和 Richard Abrahmsson，也给出了一些建议。Louis Scharf、Ben Friedlander、Mati Wax 和 John Buck 对本书的各个部分都给出了建设性的建议。Don Tufts 为我提供了大量的历史性材料，这些都很有用。我感谢这些同仁在百忙之中抽出时间为我的这本书所做的工作。他们的意见和建议对本书起到了重要的改进作用。

Harry L. Van Trees

2002 年 1 月

参考书目

- [Bry62] F. Bryn. Optimum signal processing of three-dimensional array operating on Gaussian signals and noise. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 34(3): 289-297, March 1962.
- [Van63] V. Vanderkulk. Optimum processing for acoustic arrays. *J. Brit. IRE*, 26(4): 286-292, October 1963.
- [VT66a] H. L. Van Trees. Optimum processing for passive sonar arrays. *Proc. IEEE Ocean Electronics Symp.*, pages 41-65, Honolulu, Hawaii, 1966.
- [VT66b] H. L. Van Trees. A unified theory for optimum array processing. Technical Report 4160866, Dept. of the Navy Naval Ship Systems Command, Arthur D. Little, Inc., Cambridge, MA, Aug. 1966.
- [VT68] H. L. Van Trees. *Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I*. Wiley, New York, 1968.
- [VT01a] H. L. Van Trees. *Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I*. Wiley Interscience, New York, 2001.
- [VT69] H. L. Van Trees. *Multi-Dimensional and Multi-Variable Processes*. unpublished class notes, M.I.T, 1969.
- [VT71a] H. L. Van Trees. *Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part II*. Wiley, New York, 1971.
- [VT71b] H. L. Van Trees. *Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part III*. Wiley, New York, 1971.
- [VT01b] H. L. Van Trees. *Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part III*. Wiley Interscience, New York, 2001.

目 录

第 1 章 介绍	1
1.1 阵列处理	1
1.2 应用	4
1.2.1 雷达	4
1.2.2 射电天文	5
1.2.3 声纳	5
1.2.4 通信	6
1.2.5 测向	7
1.2.6 地震学	7
1.2.7 X 射线断层摄影技术	7
1.2.8 阵列处理文献	8
1.3 本书的组织	8
1.4 交互式学习	9
第 2 章 阵列和空域滤波器	12
2.1 介绍	12
2.2 频率 - 波数响应和波束方向图	17
2.3 均匀线阵	24
2.4 均匀加权线阵	28
2.4.1 波束方向图参数	30
2.4.1.1 旁瓣的位置和旁瓣衰减的速率	33
2.4.1.2 栅瓣	34
2.5 阵列调向	35
2.6 阵列性能度量	41
2.6.1 方向性	41
2.6.2 对空域白噪声的阵列增益 (A_w)	44
2.6.3 敏感度和容错因子	46

2.6.3.1	滤波器扰动	46
2.6.3.2	阵列位置扰动	47
2.6.4	总结	49
2.7	线性孔径	50
2.7.1	频率 - 波数响应	50
2.7.2	孔径采样	52
2.8	非全向阵元方向图	52
2.9	总结	54
2.10	习题	55
第 3 章	线性阵列和孔径的合成	64
3.1	谱加权	67
3.1.1	均匀加权	68
3.1.2	cosine 加权	69
3.1.3	升 cosine 加权	69
3.1.4	cosine ^m 加权	70
3.1.5	升 cosine 平方加权	71
3.1.6	Hamming 加权	72
3.1.7	Blackman-Harris 加权	72
3.1.8	长球函数 (Prolate spheroidal functions)	73
3.1.9	Kaiser 加权	75
3.2	阵列多项式和 z 变换	77
3.2.1	z 变换	77
3.2.2	实数阵列权值	78
3.2.3	零点附近的波束方向图的性质	82
3.3	波数空间的方向图采样	84
3.3.1	连续孔径	85
3.3.2	线性阵列	86
3.3.3	离散傅里叶变换	88
3.3.4	模值	91
3.3.5	总结	92
3.4	给定旁瓣水平的最小波束宽度	92
3.4.1	引言	92
3.4.2	Dolph-Chebyshev 阵列	94
3.4.3	Taylor 分布	104
3.4.4	Villeneuve \bar{n} 分布	107
3.5	最小二乘误差方向图合成	109
3.6	最小最大设计	114
3.6.1	交替定理 (Alternation Theorem)	116

3.6.2	Parks-McClellan-Rabiner 算法	117
3.6.3	总结	119
3.7	零点调向	120
3.7.1	零点约束	120
3.7.2	零点约束下的最小二乘误差方向图合成	121
3.8	非对称波束	127
3.9	空域非均匀线阵	130
3.9.1	引言	130
3.9.2	最小冗余阵列	130
3.9.3	波束方向图设计算法	134
3.10	波束空间处理	140
3.10.1	满维波束空间	140
3.10.2	降维波束空间	143
3.10.3	多波束天线	146
3.10.4	总结	146
3.11	宽带阵列	146
3.12	总结	150
3.13	习题	151
第 4 章	平面阵列和孔径	171
4.1	矩形阵列	173
4.1.1	均匀矩形阵列	173
4.1.1.1	波束宽度	178
4.1.1.2	平面阵列的方向性	181
4.1.2	阵列流形矢量	183
4.1.3	可分离谱加权	184
4.1.4	二维 z 变换	186
4.1.5	最小二乘合成	186
4.1.6	圆对称加权和加窗	189
4.1.7	波数采样和二维 DFT	191
4.1.8	从一维到二维的变换	194
4.1.8.1	平面阵列的 Chebychev 方向图	195
4.1.8.2	修正变换	196
4.1.9	零点调向	198
4.1.10	相关问题	201
4.2	圆阵	201
4.2.1	连续圆阵列 (环状孔径)	201
4.2.2	圆阵	205
4.2.3	相位激励波束形成器	208

4.3	圆孔径	212
4.3.1	可分加权	212
4.3.2	圆孔径的 Taylor 合成	215
4.3.3	连续分布采样	217
4.3.4	差波束	219
4.3.5	总结	222
4.4	六边形阵列	222
4.4.1	简介	222
4.4.2	波束方向图设计	224
4.4.3	六边形格到矩形格变换	229
4.4.4	总结	230
4.5	非平面阵列	231
4.5.1	圆柱形阵列	231
4.5.2	球形阵列	233
4.6	总结	234
4.7	习题	235
第 5 章	空时过程的特性	243
5.1	引言	243
5.2	快拍模型	244
5.2.1	频域快拍模型	244
5.2.1.1	高斯模型	250
5.2.1.2	平面波快拍模型	252
5.2.1.3	波束形成	255
5.2.2	窄带时域快拍模型	256
5.2.3	总结	258
5.3	空时随机过程	258
5.3.1	二阶矩特性	258
5.3.2	高斯空时过程	263
5.3.3	三维空间中的平面波传播	264
5.3.4	一维和二维投影	267
5.3.4.1	投影到一维空间	268
5.3.4.2	投影到二维空间	269
5.3.4.3	总结	270
5.4	阵列和孔径	270
5.4.1	阵列	270
5.4.1.1	采样	270
5.4.1.2	谱矩阵	271
5.4.1.3	频率 - 波数空间中的波束方向图	272

5.4.1.4	相关阵列	273
5.4.1.5	传感器噪声	273
5.4.2	连续孔径天线	274
5.5	正交展开	275
5.5.1	平面波信号	277
5.5.2	空域扩展的信号	284
5.5.3	频率扩展信号	287
5.5.4	紧邻的信号	289
5.5.5	波束空间处理器	289
5.5.6	空域扩展信号的子空间	290
5.6	参数化波数模型	291
5.6.1	有理数变换函数模型	291
5.6.2	模型之间的关系	301
5.6.3	观测噪声	302
5.6.4	总结	306
5.7	总结	306
5.8	习题	307
第 6 章	最优波形估计	317
6.1	介绍	317
6.2	最优波束形成器	323
6.2.1	最小方差无畸变响应 (MVDR) 波束形成器	324
6.2.1.1	最小方差无畸变响应 (MVDR) 波束形成器	324
6.2.1.2	最大似然估计器	326
6.2.1.3	阵列增益	326
6.2.2	最小均方误差 (MMSE) 估计器	328
6.2.2.1	单个平面波信号	328
6.2.2.2	条件均值估计器	329
6.2.3	最大信噪比 (SNR)	330
6.2.4	最小功率无畸变响应 (MPDR) 波束形成器	332
6.2.5	总结	333
6.3	离散干扰	333
6.3.1	单个平面波干扰信号	333
6.3.2	多个平面波干扰	342
6.3.3	总结: 离散干扰	347
6.4	空域扩展干扰	348
6.4.1	噪声的物理模型	349
6.4.2	ARMA 模型	350
6.5	多个平面波信号	356

6.5.1	MVDR 波束形成器	357
6.5.2	MMSE 波束形成器	360
6.6	失配的 MVDR 和 MPDR 波束形成器	362
6.6.1	介绍	362
6.6.2	DOA 失配	363
6.6.2.1	常规波束形成器	364
6.6.2.2	MVDR 波束形成器	365
6.6.2.3	MPDR 波束形成器	367
6.6.3	阵列扰动	371
6.6.4	对角加载	375
6.6.5	总结	382
6.7	LCMV 和 LCMP 波束形成器	382
6.7.1	典型的约束条件	383
6.7.1.1	无畸变约束条件	384
6.7.1.2	方向性约束条件	384
6.7.1.3	零点约束条件	385
6.7.1.4	导数约束条件	386
6.7.1.5	特征矢量约束	390
6.7.1.6	静态方向图约束	392
6.7.1.7	总结	392
6.7.2	最优 LCMV 和 LCMP 波束形成器	392
6.7.3	广义旁瓣对消器	394
6.7.4	LCMV 和 LCMP 波束形成器的性能	397
6.7.4.1	阵列增益	397
6.7.4.2	方向性约束条件	399
6.7.4.3	导数约束	406
6.7.4.4	特征矢量约束条件	408
6.7.4.5	总结	408
6.7.5	静态方向图 (QP) 约束	409
6.7.6	协方差矩阵增广	415
6.7.7	总结	416
6.8	特征波束形成器	418
6.8.1	主分量 (Principal-Component) 波束形成器	419
6.8.2	互谱特征子空间波束形成器	425
6.8.3	主模式抑制波束形成器	426
6.8.4	总结	430
6.9	波束空间波束形成器	431
6.9.1	波束空间 MPDR	432
6.9.2	波束空间 LCMP	437

6.9.3 总结: 波束空间最优波束形成器	439
6.10 二次型约束波束形成器	439
6.11 软约束波束形成器	445
6.12 相关信号和干扰的波束形成	450
6.12.1 介绍	450
6.12.2 MPDR 波束形成器: 相关信号和干扰	450
6.12.3 MMSE 波束形成器: 相关信号和干扰	454
6.12.4 空间平滑和前后向平均	455
6.12.5 总结	467
6.13 宽带波束形成器	467
6.13.1 介绍	467
6.13.2 DFT 波束形成器	471
6.13.3 有限冲激响应 (FIR) 波束形成器	486
6.13.3.1 FIR 模型	486
6.13.3.2 线性约束波束形成器	492
6.13.4 总结: 宽带处理	499
6.14 总结	501
6.15 习题	502
第 7 章 自适应波束形成器	539
7.1 介绍	539
7.2 空域谱矩阵的估计	541
7.2.1 采样谱矩阵	542
7.2.2 渐近特性	544
7.2.3 前后向平均	545
7.2.4 结构化谱矩阵估计	550
7.2.5 参数化空间谱矩阵估计	550
7.2.6 奇异值分解	551
7.2.7 总结	551
7.3 采样矩阵求逆 (SMI)	552
7.3.1 SINR_{smi} 的特性: MVDR 和 MPDR	554
7.3.2 LCMV 和 LCMP 波束形成器	560
7.3.3 固定的对角加载	560
7.3.4 Toeplitz 估计器	570
7.3.5 总结	570
7.4 递推最小二乘算法 (RLS)	570
7.4.1 最小二乘问题	570
7.4.2 最小二乘的递推实现	573
7.4.3 LSE 波束形成器的递推实现	579