

# 优化阵列信号处理 (上册) : 波束优化理论与方法

*Optimal Array Signal Processing:  
Beamformer Design Theory and Methods*

鄢社锋 著



科学出版社

# 优化阵列信号处理(上册): 波束优化理论与方法

**Optimal Array Signal Processing:  
Beamformer Design Theory and Methods**

鄢社锋

著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统地介绍传感器阵列优化信号处理理论、方法及其应用。全书共 14 章,分为上、下两册,上册主要讨论波束设计的问题,介绍阵列信号处理基本概念与模型、窄带阵列信号处理,以及宽带阵列信号处理的理论与方法;下册主要讨论模态阵列处理与方位估计的问题,介绍声学阵列模态处理理论与方法,以及目标方位谱估计理论与方法。书中融入了作者近二十年来从事阵列信号处理方面科研工作的实际经验,纳入了作者在国内外重要刊物发表的数十篇论文,同时采纳了少量散见于各种文献中的部分相关内容。

本书可作为声呐、雷达、麦克风阵列、无线通信等阵列信号处理相关专业的本科生、研究生和教师的参考书,也可供相关专业科学研究与工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

优化阵列信号处理.上册,波束优化理论与方法 / 鄢社锋著.  
—北京:科学出版社,2018.3

ISBN 978-7-03-043964-2

I. ①优… II. ①鄢… III. ①信号处理 IV. ①TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 034897 号

责任编辑:赵艳春 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:师艳茹 / 封面设计:迷底书装

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018 年 3 月第 一 版 开本:720×1 000 1/16

2018 年 3 月第一次印刷 印张:20 3/4

字数:403 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

本书是一部阐述传感器阵列优化处理的专著。阵列信号处理在声呐、雷达、无线通信、医学成像、地质勘探、射电天文学等多个领域具有广泛的应用，几十年以来一直是一个活跃的研究方向，阵列优化处理是其中一个十分重要的问题。作者于2008年与博士指导教师马远良院士合作出版了一部专门介绍阵列信号处理中的波束优化问题的专著《传感器阵列波束优化设计及应用》，将作者攻读博士学位与两站博士后工作期间取得的研究成果呈现在了读者面前。

受导师马远良院士的抬爱，他在为那本专著撰写的序言中写道：“鄢社锋的主要创造性贡献是，他将二阶锥规划技术引入传感器阵列的波束优化设计中，从而开启了多约束波束优化之门，形成了波束优化设计的较完备的理论框架。在此基础上，提供了对各种波束质量指标，包括主瓣宽度、旁瓣级、主瓣响应逼近误差、波束形成器的稳健性、宽带波束的频域与空域特性等进行全面折中处理的方法。”

作者2008年以来担任中国科学院声学研究所研究员，现同时是中国科学院大学教授，近四年在中国科学院大学为研究生讲授“阵列信号处理”与“声呐原理及信号处理”两门专业核心课，将《传感器阵列波束优化设计及应用》用作课程教材，受到了学生的欢迎。遗憾的是，学生反映早已无法从市场上购买到此书，而只好使用影印本，期望能再版。2009年以来，作者将在阵元域优化处理的研究成果推广到了模态域处理，在声学阵列的模态处理方面又取得了新的研究成果，这些研究成果进一步补充完善了优化阵列处理理论与方法。基于这两点原因，作者决定在上一部专著的基础上，补充撰写新近研究成果，使得内容更为系统完整，这便是撰写本书的初衷。

本书是作者基于近二十年来从事阵列信号处理相关科研工作的研究成果撰写而成的，融入了作者在西北工业大学、中国科学院声学研究所、挪威科技大学学习与工作期间的部分研究成果，纳入了作者在国内重要刊物发表的数十篇学术论文，同时采纳了少量散见于各种文献中的部分相关内容。

全书共14章，分为上、下两册。

上册为《优化阵列信号处理：波束优化理论与方法》，主要讨论波束设计问题。

第1章是绪论，介绍阵列波束优化设计的历史与技术现状，以及本书的主要研究内容。第2章介绍阵列信号处理与波束形成的基本知识及数学模型，指出评价波束形成器性能的参数指标。第3章介绍具有规则几何形状基阵的波束形成方法与性能。

第4~7章介绍窄带波束形成器优化设计问题，这4章分别针对波束形成器的几种重要性能评价指标进行优化折中求解，获得满足设计要求的最优综合性能，其中第4章分析影响波束形成器稳健性的因素与影响机理，第5章介绍提高波束形成器稳

健性的方法,第6章介绍波束旁瓣设计问题,第7章介绍波束主瓣设计的问题,并归纳出窄带波束优化设计的统一框架,前述稳健类、旁瓣设计类以及主瓣设计类波束优化方法均可视作其特例。于是基于这一统一框架可以考察各特例方法的优缺点。

第8章与第9章介绍宽带波束形成问题,其中第8章介绍宽带波束形成器的实现问题,包括基于离散傅里叶变换的频域实现方法与基于有限冲激响应滤波器的时域实现方法,第9章介绍基于有限冲激响应滤波器的时域宽带波束形成器优化设计问题,并将窄带波束优化设计统一框架推广到时域宽带波束优化设计。

下册为《优化阵列信号处理: 模态处理与方位估计》,主要讨论声学阵列模态处理与目标方位估计问题。

第10章介绍圆环阵波束形成问题,分析圆环阵波束形成器的特性,引出圆环相位模式处理理论。

第11章与第12章介绍模态波束形成问题,其中,第11章介绍用于圆环阵的圆谐波波束形成器设计与实现方法,第12章介绍用于球面阵的球谐波波束形成器设计与实现方法,并将前述窄带与时域宽带波束优化设计统一框架进一步推广到模态域处理。基于该统一框架,发现圆环阵相位模式阵列处理等效于平面均匀噪声场情况下圆环谐波域最小方差无失真响应波束形成器,而球面阵相位模式阵列处理等效于空间均匀噪声场情况下球谐波域最小方差无失真响应波束形成器。这一发现使得相位模式阵列处理方法稳健性差的原因得到解释,并提出通过谐波域白噪声增益约束可使其稳健性提高。

第13章与第14章介绍目标方位估计方法,前面几章介绍的波束优化设计与波束形成方法在这两章得到具体应用。其中,第13章介绍基于波束扫描的方位谱估计方法,包括阵元域与模态域方法。第14章介绍信号子空间高分辨方位估计方法,包括阵元域、模态域与波束域的窄带与宽带方位谱估计方法等。

本书为了验证书中介绍的各种方法的性能,以及便于对不同方法进行比较,做了大量的设计计算,为读者提供了大量的设计范例。而且为了便于读者掌握本书介绍的各种方法,并能重现本书中的各个算例,本书所有算例均采用计算机仿真,并给出了详细仿真步骤。读者如果需要考察各方法在实际环境中的使用效果,可以参阅作者发表的相关论文。

本书涉及的相关研究工作得到了作者的博士指导教师马远良院士和博士后合作导师侯朝焕院士的指导。他们对本书的撰写给予了支持与鼓励,并提出了部分修改意见,在此对两位恩师表示感谢。同时感谢国家自然科学基金(No. 61725106, No. 61431020)的资助。

限于作者的水平与经验,书中难免存在一些疏漏,恳请读者批评指正。

作者

2017年9月

# 目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 阵列信号处理应用范围	1
1.2 研究历史与现状	2
1.2.1 阵增益与稳健性	3
1.2.2 波束图优化设计	5
1.2.3 恒定主瓣响应波束设计	8
1.2.4 波束形成器的实现	9
1.2.5 模态阵列信号处理	12
1.2.6 目标方位估计	15
1.2.7 二阶锥规划求解方法	16
1.3 本书的结构	16
第 2 章 阵列信号处理数学模型	18
2.1 引言	18
2.2 数学模型	19
2.2.1 基阵	19
2.2.2 信号模型	20
2.2.3 噪声场模型	24
2.2.4 基阵接收数据模型	26
2.2.5 快拍数据模型	28
2.3 波束形成	32
2.3.1 波束形成表达形式	32
2.3.2 窄带波束形成	34
2.3.3 窄带波束形成器的性能参数	35
2.3.4 波束扫描方位谱	44
2.4 常见的波束形成器	45
2.4.1 常规波束形成器	45

2.4.2	最佳波束形成器	48
2.5	本章小结	55
<b>第3章</b>	<b>规则阵波束设计</b>	<b>57</b>
3.1	引言	57
3.2	线阵	57
3.2.1	连续线阵	57
3.2.2	均匀线列阵	65
3.2.3	二元阵	73
3.2.4	均匀线列阵窗函数加权	78
3.3	矩形阵	83
3.3.1	波束图乘积定理	83
3.3.2	均匀矩形阵	84
3.4	本章小结	87
<b>第4章</b>	<b>波束稳健性分析</b>	<b>89</b>
4.1	引言	89
4.2	最佳波束形成器稳健性影响因素	89
4.3	导向向量失配对波束性能的影响	91
4.4	协方差矩阵失配对波束性能的影响	97
4.4.1	样本协方差矩阵求逆波束形成	97
4.4.2	样本协方差矩阵求逆法波束性能	98
4.5	超增益波束形成器的稳健性	101
4.6	本章小结	104
<b>第5章</b>	<b>稳健波束设计</b>	<b>105</b>
5.1	引言	105
5.2	对角加载法	105
5.3	加权向量范数约束法	115
5.3.1	加权向量范数约束与对角加载波束形成器的关系	115
5.3.2	范数约束波束形成器的二阶锥规划求解方法	117
5.3.3	范数约束波束形成器对角加载量求解法	117
5.4	最差性能最佳化法	124
5.5	协方差矩阵拟合法	126
5.6	双约束法	133

5.6.1	算法描述	133
5.6.2	尽可能小的椭圆不确定集	136
5.7	各种波束形成方法性能比较	141
5.8	本章小结	147
<b>第 6 章</b>	<b>波束旁瓣设计</b>	<b>150</b>
6.1	引言	150
6.2	凹槽噪声法	151
6.3	零点展宽技术	157
6.3.1	干扰方位扩展法	158
6.3.2	频带扩展法	159
6.3.3	协方差矩阵锥化法	160
6.4	最低旁瓣波束形成器	163
6.4.1	最低旁瓣波束设计	163
6.4.2	稳健最低旁瓣波束设计	168
6.5	旁瓣控制高增益波束形成器	170
6.5.1	低旁瓣自适应波束设计	170
6.5.2	旁瓣控制高增益波束设计	171
6.5.3	稳健旁瓣控制波束设计	173
6.6	抗阵列流形误差的稳健低旁瓣波束形成	177
6.6.1	问题描述	177
6.6.2	$\ell_2$ 范数准则	178
6.6.3	$\ell_1$ 范数准则	179
6.6.4	最差旁瓣下界	181
6.7	本章小结	185
<b>第 7 章</b>	<b>波束主瓣设计</b>	<b>187</b>
7.1	引言	187
7.2	最小误差逼近法	188
7.2.1	误差范数表述	188
7.2.2	最小均方准则法	189
7.2.3	最小误差范数法	192
7.3	期望主瓣响应波束设计	195
7.3.1	问题描述	195



7.3.2	旁瓣控制主瓣最小误差逼近	196
7.3.3	主瓣精度约束最低旁瓣波束设计	197
7.3.4	窄带波束优化统一形式	199
7.4	恒定主瓣响应波束设计	201
7.4.1	宽带波束图	201
7.4.2	恒定主瓣响应波束图	202
7.5	期望主瓣幅度响应波束设计	207
7.5.1	问题描述	207
7.5.2	相位迭代法	207
7.5.3	分解迭代法	208
7.6	本章小结	214
<b>第 8 章</b>	<b>宽带波束形成</b>	<b>216</b>
8.1	引言	216
8.2	频域 DFT 波束形成器	217
8.2.1	DFT 波束形成	217
8.2.2	另一种解释	220
8.2.3	分析与讨论	222
8.3	时域 FIR 波束形成器	226
8.4	基于 FFT 的 FIR 波束形成	229
8.5	FIR 波束形成器中的滤波器设计	231
8.5.1	最小加权误差准则	232
8.5.2	约束最小加权误差准则	236
8.6	FIR 波束形成器分步设计法	239
8.6.1	设计原理	239
8.6.2	时域宽带常规波束形成	241
8.6.3	恒定主瓣响应 FIR 波束形成器	244
8.6.4	旁瓣控制高增益 FIR 波束形成器	246
8.7	本章小结	248
<b>第 9 章</b>	<b>宽带优化波束设计</b>	<b>250</b>
9.1	引言	250
9.2	最小合成误差全局优化恒定主瓣响应 FIR 波束形成	251
9.2.1	分步设计法的局限性	251

9.2.2	FIR 宽带波束响应	252
9.2.3	恒定主瓣响应 FIR 波束形成器	254
9.3	宽带自适应 FIR 波束形成	260
9.3.1	数据协方差矩阵	260
9.3.2	自适应 FIR 波束形成器设计	263
9.3.3	旁瓣控制自适应 FIR 波束设计	266
9.4	最小差异恒定主瓣响应 FIR 波束形成	273
9.4.1	最小合成误差全局优化法的局限性	273
9.4.2	最小差异设计法	274
9.4.3	宽带 FIR 波束优化统一形式	283
9.5	几种宽带 FIR 波束设计方法比较	285
9.6	本章小结	286
	参考文献	288
	附录 A 二阶锥规划方法	303
A.1	二阶锥规划简介	303
A.2	二阶锥规划求解软件 SeDuMi	305
	附录 B 部分主要的符号说明	307
B.1	缩写词	307
B.2	变量符号	308
B.3	部分算术符号	316
	附录 C 设计实例目录	318

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 阵列信号处理应用范围

阵列信号处理在雷达、声呐、无线通信、医学成像、地质勘探、射电天文学等多个领域具有广泛的应用。

雷达是阵列处理最早的应用领域。雷达在军用与民用方面都具有较多应用，大多数雷达是主动系统，天线阵既用于发射信号也用于接收信号。相控阵天线的概念早在第一次世界大战期间就已经形成<sup>[1]</sup>，在第二次世界大战中得到了实际应用，如美国海军的火控雷达系统<sup>[2]</sup>与高分辨导航雷达<sup>[3]</sup>。Skolnik<sup>[4]</sup>对雷达相控阵的应用有详细的描述，文献[5]和文献[6]对雷达系统不同方面应用进行了论述。Gini 等列出了截至 2000 年关于雷达信号处理方面的近 700 篇文献<sup>[7]</sup>。

声呐系统也广泛应用阵列处理。Baggeroer 等<sup>[8]</sup>、Knight 等<sup>[9]</sup>与 Owsley<sup>[10]</sup>都对声呐系统中的阵列处理有详细的论述。主动声呐在水中发射声波并接收处理回波，其原理与雷达有很多相似之处。不同的是，声波在水中的传播比电磁波在大气中的传播更复杂，传播特性对声呐系统设计有较大的影响。Urick 的著作<sup>[11]</sup>是讨论关于水下声波传播的重要文献。被动声呐系统主要是被动接收声波信号，然后估计声场的时空特性。被动声呐的一个重要的应用是对潜艇进行检测与跟踪。有关声呐系统与声呐信号处理方面的描述可以参阅文献[12]~文献[14]。

天线阵列也被用于无线通信系统<sup>[15]</sup>。最早在 20 世纪 30 年代就被用于横跨大西洋进行短波通信<sup>[16]</sup>。现在，天线阵列还用于卫星通信及无线手机通信<sup>[17-21]</sup>。例如，“智能天线”就是指无线系统中使用的自适应阵。

阵列处理还被用于医学成像<sup>[22-24]</sup>、地质勘探<sup>[25-27]</sup>、射电天文学<sup>[28-33]</sup>、麦克风阵列处理<sup>[34-37]</sup>等多个领域。

自 20 世纪 60 年代以来，阵列信号处理领域已经在 IEEE 系列期刊出版了数次专辑(如 *IEEE Trans. Antennas Propagat.*<sup>[38-40]</sup>、*IEEE J. Oceanic Eng.*<sup>[41]</sup>与 *Proc. IEEE*<sup>[42]</sup>)与综述<sup>[43-49]</sup>。大量的关于阵列信号处理的研究论文除了发表在前面提到的几种期刊之外，比较多的还发表在 *IEEE Trans. Signal Processing*、*IEEE-ACM Trans. Audio Speech Lang. Process.*、*IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*、*J. Acoust. Soc. Am.* 等期刊上。到目前为止，国外已经出版了阵列信号处理方面的重要专著<sup>[50-63]</sup>，国内也有部分相关著作<sup>[64-68]</sup>出版。

## 1.2 研究历史与现状

波束形成 (beamforming) 是阵列信号处理的一个非常重要的任务, 它采用空间分布的传感器阵列采集包含期望信号与噪声<sup>[69,70]</sup>的物理场(声场、电磁场等)数据, 然后对所采集的阵列数据进行线性加权组合处理得到一个标量波束输出, 该处理器称为波束形成器。

波束形成的主要功能包括: 形成基阵接收系统的方向性; 进行空域滤波, 抑制空间干扰与环境噪声, 提高信噪比; 估计信号到达方向, 进行多目标分辨; 为信号源定位创造条件; 为目标识别提供信息等。通过波束形成处理, 实现对目标的检测与定位。

根据所处理的数据的频带宽度进行划分, 波束形成器可分为窄带波束形成器与宽带波束形成器。在窄带波束形成器中, 各阵元数据进行加权求和得到输出。通过设计合适的加权值, 可以有选择性地增强来自某一指定方向的信号, 抑制其他方向到达的信号(称为干扰与噪声), 提高输出信噪比。这与时域处理中通过设计有限冲激响应 (finite impulse response, FIR) 滤波器系数, 有选择性地使某些频率成分通过, 抑制其他频率成分的处理过程非常相似。因此, 波束形成器也被称作空域滤波器<sup>[45]</sup>。宽带波束形成器以窄带波束形成器为基础, 窄带波束形成器可以看作宽带波束形成器的特例。鄢社锋等对宽带波束形成器的设计与实现进行了综述<sup>[71]</sup>。

传感器阵列的空域滤波性能由其结构形状、阵元数目及处理算法等因素决定。阵列的结构形状往往受其安装的空间环境所限制, 阵元数目受信号场空间相关半径与设备成本的限制, 因此提高阵列性能的一种较好的途径是改进阵列处理算法, 即根据不同的需求与应用背景设计高性能的波束形成器。

加权值决定了波束形成器的空间滤波特性, 波束形成器根据其加权值的选择可以分为数据独立波束形成器与统计最优的波束形成器两种。数据独立波束形成器的加权值是固定的, 不随接收数据的变化而变化, 对接收数据提供固定的响应, 包括常规(时延求和)波束形成器与部分旁瓣控制波束形成器(如 Chebyshev 波束形成器<sup>[72]</sup>等)。统计最优波束形成器基于接收数据的统计特性对加权值进行优化。例如, 多旁瓣抵消器 (multiple sidelobe canceller, MSC)<sup>[73]</sup>、最大信噪比法波束形成器<sup>[74]</sup>、线性约束最小方差 (linearly constrained minimum variance, LCMV) 波束形成器<sup>[75]</sup>等都属于统计最优波束形成器。阵列数据的统计性有时是未知的, 甚至可能随时间发生变化, 这就需要采用自适应算法获得统计优化波束形成器的加权向量。Marr 列出了 1986 年以前关于自适应天线阵列的部分文献<sup>[44]</sup>。当阵元数目很大时, 为了减小计算量, 就会采用部分自适应算法, 而其代价是损失一部分最优性能。在实际应用中, 由于各种失配误差的影响, 波束形成器的实际性能相比于理想情况有所下降<sup>[76]</sup>, 有些波束形成器比较稳健, 而有些对误差敏感。

波束形成器性能的优劣,一般可以从以下几个重要性能指标来考察:主瓣宽度、旁瓣级、阵增益、稳健性、主瓣响应、频率响应等。低旁瓣可以有效抑制来自旁瓣区域的干扰,降低目标检测的虚警概率;窄的主瓣宽度可以提高目标方位分辨能力;高的阵增益可以提高系统对弱目标的检测能力;高稳健性使波束形成的性能受各种失配的影响减小。波束优化设计的目的就是使波束形成器的这些性能最优。

波束形成器的这几个性能之间不是独立的,而是相互关联的,波束优化设计就是在这些互相冲突的性能之间寻找最佳的折中,设计出满足需要的、综合性能最优的波束形成器<sup>[77]</sup>。文献中的波束优化设计方法就是对这几个性能指标中的一个或多个指标进行优化或折中。例如,Dolph于1946年提出了在波束主瓣宽度与旁瓣级之间寻优的Dolph-Chebyshev波束设计方法<sup>[72]</sup>。Capon于1969年提出了使理想阵增益最高的最小方差无失真响应(minimum variance distortionless response, MVDR)波束形成器<sup>[78]</sup>,后人也称为Capon波束形成器。Cox等于1987年提出稳健自适应波束处理方法<sup>[79]</sup>,提高基阵波束形成器对基阵误差的稳健性。这些是波束形成器优化设计方面的几个具有里程碑意义的重要文献,其他的文献大多以它们作为研究基础,对它们的性能进行改进。

下面分别从几个方面回顾波束形成器优化设计的历史与现状。

### 1.2.1 阵增益与稳健性

常规波束形成器对各通道数据通过简单的延迟求和达到空间滤波的效果,它具有最好的稳健性。但由于它受到基阵孔径大小的限制,空间处理增益有限,空间分辨率较低。Capon波束形成器在保证对感兴趣方位的信号无失真输出的条件下,使基阵输出功率最小,最大限度地提高输出信噪比,或者说最大限度地提高阵增益,具有很好的干扰抑制能力。Capon波束形成器也可以解释为协方差矩阵拟合问题<sup>[80]</sup>,具有很好的方位分辨能力。空间均匀噪声场中的端射阵使用Capon波束形成器可以获得远高于常规处理的“超增益”<sup>[81]</sup>。

但是Capon波束形成方法是建立在阵列对期望信号的响应精确已知的假想基础上的,它对基阵的误差比较敏感。要获得较高的性能,需要精确知道期望信号响应向量(称为导向向量)与噪声(包括干扰)协方差矩阵。

在实际场景中,波束加权向量存在误差<sup>[82]</sup>。对于Capon波束形成器,加权向量同导向向量与噪声协方差矩阵有关,而导向向量与噪声协方差矩阵都存在误差,造成Capon波束形成器的性能下降严重。

首先,阵列对期望信号的假想响应与真实响应失配。造成这种失配的原因有:观察方向误差<sup>[83-86]</sup>,阵形标定误差<sup>[87,88]</sup>,未知波前扭曲与信号衰减<sup>[89-92]</sup>,近场模型失配<sup>[93]</sup>,局部散射<sup>[94-97]</sup>,环境非平稳造成信号和噪声幅度与相位起伏<sup>[98]</sup>等。传统的自适应阵算法对这些类型的轻微失配会特别敏感,因为在这些情况下,所施加的无

失真约束条件并不是恰好针对实际期望信号,自适应波束形成器会把实际期望信号误作为干扰而形成零陷<sup>[99]</sup>,导致信号自消现象。Capon 波束形成器相比于标准波束形成器性能就会下降<sup>[100,101]</sup>。

其次,噪声协方差矩阵一般是未知的,往往采用自适应方法估计的数据协方差矩阵<sup>[102]</sup>来代替。一方面,采用有限样本估计的数据协方差矩阵与真实数据协方差矩阵间存在误差,训练样本越少,误差越大;另一方面,传统的自适应波束形成方法假设在训练数据中不包括期望信号成分<sup>[74,103]</sup>。虽然在某些情况下(如雷达与主动声呐应用中)这种假设是可能的,但是在更多情况下,观察数据中一般含有期望信号成分,如被动声呐、无线通信、麦克风阵列与天文学等应用。

使用样本数据协方差矩阵代替噪声协方差矩阵对自适应波束形成造成的影响是旁瓣升高<sup>[104]</sup>与阵增益减小。在训练数据中不包括期望信号成分时,自适应波束形成算法对导向向量误差与较少训练样本还具有一定的稳健性<sup>[105,106]</sup>。但是当训练数据中包含期望信号时,传统的自适应波束形成方法就会产生信号“自消”现象<sup>[107]</sup>,此时波束性能与收敛速率就会严重下降<sup>[108]</sup>。即使是导向向量精确已知但训练样本有限时亦是如此。有趣的是,由于训练样本较少产生的协方差矩阵误差对 Capon 波束形成器性能的影响可以看作好像是由于导向向量误差引起的<sup>[99]</sup>。输入信噪比越高,性能下降程度越剧烈。在高信噪比的情况下,即使很小的随机误差都会使基阵增益严重下降,甚至下降到比常规波束形成器还差,高增益与稳健性是一对矛盾。

为了减小 Capon 波束形成器对各种误差失配引起的性能下降,近 40 年来已经出现了大量的方法来提高自适应波束形成器的稳健性。例如,线性约束最小方差波束形成,包括点约束<sup>[75,105]</sup>与微分约束<sup>[109-111]</sup>等。它对信号到达方向的不确定性具有较好的稳健性<sup>[109]</sup>,但是这种技术只适用于观察方向失配情况,对其他类型导向向量失配,如阵形扰动、阵列流形模型误差、波前扭曲、源局部散射等产生的失配并不能提供足够的稳健性。而且它会减小波束形成器的自由度,降低其干扰抑制能力。

在能够部分解决任意导向向量失配问题的其他几种方法中,最常用的是二次约束波束形成方法<sup>[79,112,113]</sup>与基于特征空间的波束形成方法<sup>[99,114-117]</sup>。二次约束方法对权向量的 Euclidean 范数施加一个二次约束。早期由于加权向量范数约束方法难以直接实现,所以一般采用样本协方差矩阵对角加载波束形成方法<sup>[50,79,118-121]</sup>来实现。这些对角加载方法及其改进方法能够提供信号导向向量失配与样本协方差矩阵存在误差情况下的稳健波束形成,是一种比较简便易行的方法,得到了广泛的应用。不过,这种对角加载方法的主要缺点是无法根据失配的程度获得优化的对角加载量。基于子空间的方法要求知道噪声协方差矩阵的信息,不仅对导向向量误差敏感,而且对噪声协方差矩阵的不精确性也非常敏感,即使能提高对导向向量的稳健性,仍不能解决其对噪声协方差矩阵的敏感问题,而且在低信噪比的情况或当信号加干扰子空间维数较高时失效,往往需要精确知道信号加噪声子空间的维数。这导致该类

方法难以应用于无线通信领域,因为在无线通信中由于信号局部散射的影响导致信号加干扰子空间维数不确定,且相对较高<sup>[94-97]</sup>。

2003年后,Gershman等<sup>[122,123]</sup>、Li等<sup>[124-126]</sup>、Boyd等<sup>[127]</sup>分别提出了能够根据导向向量不确定范围来选取参数的稳健波束形成方法,具有更清晰的理论背景。有趣的是,这几种方法也属于对角加载类算法,与普通的对角加载算法不同的是,它们明确利用了导向向量误差信息,能够根据导向向量误差椭圆不确定集来精确计算对角加载量。其中三种方法<sup>[122,125,127]</sup>本质上是相同的,但求解方法各不相同,它们能够统一起来。Kim等将这一类方法进一步发展<sup>[128]</sup>,能处理更灵活的导向向量与协方差矩阵模型不确定性问题。

本书第4章对波束形成器的稳健性进行分析,第5章具体阐述稳健波束形成器的设计问题。

## 1.2.2 波束图优化设计

在1.2.1节中介绍的优化波束形成方法仅仅是对波束形成器的阵增益与稳健性这两个性能指标进行优化,并没有考虑波束图形状。波束图优化设计包括两方面的研究内容,一个是控制波束旁瓣,另一个是设计波束主瓣响应。近年来这两方面的设计问题逐渐受到人们的关注,文献中将这两方面波束图设计问题称作波束图综合(array pattern synthesis)问题。本书将旁瓣控制问题与期望响应波束设计问题分开讨论,书中所说的“波束图综合”主要指期望响应波束设计问题。

首先考虑旁瓣控制波束设计问题。对于固定阵形与噪声场,常规波束形成器的旁瓣都是固定的。当它运用于某些形状的基阵时,旁瓣可能会比较高。对于实际基阵系统,单个传感器可能不是各向同性的,各传感器的灵敏度也不太相同。当换能器安装到基阵架上后,结构遮挡与散射、阵元互耦、预处理通道的不一致性等因素造成各阵元的不一致性更加严重,这些都会使旁瓣进一步升高。另外,在统计最优波束形成器中,为了追求高增益而造成波束旁瓣升高,有时会达到难以忍受的程度。由于过高的旁瓣使得系统虚警概率增高,所以旁瓣控制问题成为波束优化的一个重要研究问题。

到目前为止,已经出现了大量的旁瓣控制优化波束形成方法。早期的方法只针对规则形状阵列。最经典的是Dolph<sup>[72]</sup>于1946年提出的Dolph-Chebyshev方法,该方法能产生恒定旁瓣级,可以根据给定的旁瓣级或主瓣宽度计算出权向量<sup>[129]</sup>。对于半波长间隔均匀线列阵,Dolph-Chebyshev方法在给定主瓣宽度的条件下能获得最低的旁瓣级,或者在给定旁瓣级的条件下能够得到最小的主瓣宽度。Riblet将Dolph的方法进一步推广,称为Riblet-Chebyshev方法<sup>[129]</sup>。对于半波长间隔均匀线列阵,两种方法相同;但当阵元间隔小于半波长且阵元数为不小于7的奇数时,Riblet-Chebyshev法能获得更窄的主瓣。不幸的是,这两种Chebyshev方法只适用于

由各向同性阵元组成的均匀线列阵, 对其他阵形或阵元非各向同性时无能为力。Taylor 提出了适用于连续线阵<sup>[130]</sup>和圆面阵<sup>[131]</sup>的旁瓣约束方法, 该方法约束最大旁瓣高度, 并获得远离主瓣方向逐渐下降的旁瓣。Elliott 对 Taylor 的方法进行了改进<sup>[132]</sup>, 使旁瓣高度能个别指定。Villeneuve 将 Taylor 的方法运用于离散线列阵<sup>[133]</sup>。Hansen<sup>[134]</sup>对这一类旁瓣控制波束图设计方法进行了总结。但是, 所有这些方法都只适用于特定形状的基阵, 且要求各阵元是各向同性的。对于其他的任意几何形状阵形、阵元本身具有指向性, 或组成基阵的各阵元灵敏度存在差异时, 就不能够获得理想的期望旁瓣。

基于自适应阵原理的旁瓣控制方法适用于任意结构的基阵。在存在干扰的情况下, 自适应波束形成器能够在干扰方向自动形成一个“凹槽”。基于该原理, 马远良于 1984 年提出了适用于任意结构形状传感器阵方向图的最佳化方法——“凹槽噪声场法”<sup>[135]</sup>。他通过在旁瓣区域人为放置若干虚拟干扰源, 获得了主瓣宽度约束下最低旁瓣级加权向量的数值解。基于同样的原理, Olen 等于 1990 年提出了静态波束图的数字综合方法<sup>[136]</sup>, 该方法对旁瓣区域内噪声源的自适应调整做了进一步的讨论。基于 Olen 方法, 通过反复迭代过程, 可以获得给定主瓣宽度条件下的最低均匀旁瓣级<sup>[137]</sup>, 相当于将 Chebyshev 方法推广到任意形状阵列。吴仁彪等通过引入实测阵列流形, 提出了阵列流形严重畸变情况下的波束旁瓣控制方法<sup>[138,139]</sup>。该方法能够使设计波束受到的基阵结构散射、遮挡、阵元互耦、通道不一致性等不良影响得到最大限度的消除。该方法已经成功地应用于体积阵优化设计。不过, 这一类方法的主要缺点是, 由于它们是采用自适应或迭代方法实现的, 并不能保证完全收敛, 不能保证旁瓣得到严格控制, 误差比较大。而且 Olen 方法在迭代过程中对主瓣宽度没有约束, 容易造成主瓣较快增宽。换言之, 在给定旁瓣级的条件下并不能保证获得最窄的主瓣。

在给定波束主瓣宽度的情况下, 波束能获得的最低旁瓣是有限的。当干扰功率太大时, 即使从波束旁瓣方位入射, 仍旧会对主瓣入射的期望信号产生较大的干扰, 此时我们需要在干扰方向形成凹槽或零点来对干扰进行抑制。虽然自适应方法可以在干扰方向形成零点, 但当目标运动时, 自适应方法产生的零点可能难以跟踪目标的运动<sup>[140]</sup>, 这时需要采用零点展宽技术<sup>[141-149]</sup>, 使得波束旁瓣区域形成一个较宽的凹槽, 保证干扰方向始终位于凹槽内。

除了波束旁瓣控制之外, 期望响应设计是波束图设计问题的另一个研究方向。二次规划方法<sup>[150-156]</sup>是适用于任意结构基阵的期望响应波束设计方法, 其原理就是使设计的波束与期望波束的均方误差(或  $\ell_2$  范数)最小。如果通过选择一定的期望波束(例如, 让波束观察方向期望响应为 1, 旁瓣期望响应为 0), 该方法也可以达到控制旁瓣的目的。朱维杰等利用时空域处理类比关系, 将 Widrow 和 Stearns 提出的期望响应 FIR 滤波器最小均方准则(least mean square, LMS)自适应设计法<sup>[52]</sup>运用于波



束形成器设计,使设计波束响应按最小均方准则逼近于期望波束响应<sup>[157]</sup>,它也可视为一种二次规划法。但是由于自适应算法中迭代步长难以选择,并不能保证完全收敛,导致设计结果存在一定的误差。事实上,期望响应波束最小均方逼近问题具有最小二乘解析解,二次规划方法的设计精度至多逼近于该解析解。二次规划方法的一个主要缺点是,它只使用了误差的 $\ell_2$ 范数逼近准则,相当于使设计波束在全方位(包括主瓣区域与旁瓣区域)同时逼近于期望波束,而我们真正感兴趣的只是波束主瓣区域,这些方法相当于在旁瓣区域增加了多余的等式约束,必然造成设计波束与参考波束主瓣区域拟合误差增大。Er提出的方法<sup>[158,159]</sup>在设计期望响应主瓣的同时,控制波束均方旁瓣级。事实上,对于旁瓣区域,我们往往更希望控制最高旁瓣峰,即控制旁瓣与零电平之间的最大误差( $\ell_\infty$ 范数),这是二次规划方法无法实现的。因此,很有必要研究混合范数逼近优化波束设计方法,例如,在主瓣区域采用最小均方逼近准则,在旁瓣区域采用 $\ell_\infty$ 范数准则。

在以上提到的所有波束图优化设计(包括旁瓣控制与期望响应波束设计)方法中,都仅仅是对波束主瓣或旁瓣进行优化,既没有考虑波束形成器的稳健性,也没有考虑由于旁瓣控制而对阵增益产生的副作用,这使得这些方法在使用时存在很多缺陷。因为波束的这几个指标之间是相互关联的,单纯地优化其中一两个指标时,其他性能往往会变差。因此,非常有必要同时考虑波束形成方法对旁瓣级、稳健性与阵增益等多方面的影响,能在它们之间进行合理综合折中。

自从Boyd等<sup>[160]</sup>引入凸优化(convex optimization<sup>[161]</sup>)算法之后,出现了一类灵活的波束图设计方法。鄢社锋等借鉴凸优化算法的强大功能,运用新近发展起来的一类凸优化方法——二阶锥规划<sup>[162]</sup>(second-order cone programming, SOCP)方法进行优化波束设计,提出了一整套兼顾多个性能指标的波束形成器优化设计方法,包括稳健低旁瓣高增益波束设计<sup>[163,164]</sup>与稳健低旁瓣期望主瓣响应波束设计<sup>[165,166]</sup>等。对于前者,采用Minimax准则(亦称Chebyshev准则)控制波束旁瓣,其实是将前面提到的Chebyshev波束设计方法<sup>[72,129]</sup>推广到任意阵形,且能考虑阵元方向性,更重要的是该方法能够通过加权向量范数施加约束来提高波束形成器的稳健性。对于后者,采用混合范数准则,让主瓣响应与旁瓣按不同的准则逼近期望值(让误差 $\ell_2$ 或 $\ell_\infty$ 范数最小),能满足多样化的设计需求,且能提高波束稳健性。

在某些应用中,如发射波束设计问题中,只需考虑波束幅度响应,对波束相位响应并不作要求,这种问题称为期望幅度响应波束设计问题。对于该设计问题,期望响应(包括幅度响应与相位响应)波束只是它的一个次优解。如果不考虑相位响应,期望幅度响应波束形成器应该能获得更高的主瓣幅度逼近精度。Wang等<sup>[167]</sup>与Shi等<sup>[168]</sup>分别采用半定规划<sup>[169]</sup>(semidefinite programming)迭代的方法与最小均方迭代方法来设计期望幅度响应波束。后者方法由于在每次迭代中采用最小均方准则,同样存在前面所述的旁瓣冗余等式约束问题;前者的方法通过适当改进,仅对主瓣进