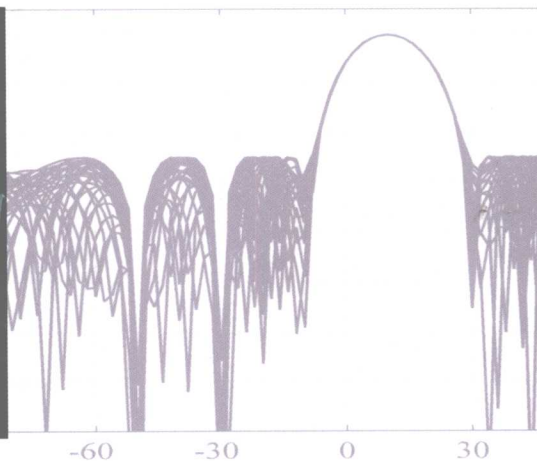
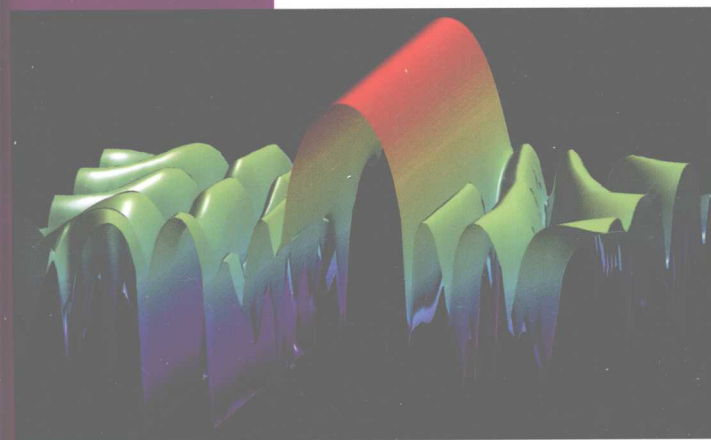


Sensor Array Beampattern Optimization:
Theory with Applications

鄢社锋 马远良/著

传感器 阵列波束优化设计 及应用



 科学出版社
www.sciencep.com

TN911.7
671
1-

传感器阵列波束 优化设计及应用

鄢社锋 马远良 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了传感器阵列波束形成器优化设计方法及其应用。全书分8章,主要叙述了窄带波束优化设计方法、宽带波束形成器实现方法及宽带波束优化设计方法,最后将各波束形成方法应用于目标方位估计。书中融入了作者及合作者多年来从事阵列信号处理方面科研工作的实际经验,纳入了作者近年来在国内外重要期刊发表的十余篇论文,同时也采纳了少量散见于各种文献中的部分内容。

本书对波束优化设计问题叙述详尽,理论分析力求系统、深入,说理深入浅出,便于自学。本书可作为声呐、雷达及无线通信信号处理专业的本科生、研究生和教师的参考书,也可供有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

传感器阵列波束优化设计及应用/鄢社锋,马远良著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-022922-9

I. 传… II. ①鄢…②马… III. 信号处理 IV. TN911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第137359号

责任编辑:余 丁 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2009年1月第一次印刷 印张:19 1/2

印数:1—2 000 字数:378 000

定价:80.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

序 言

阵列信号处理中的波束优化问题,是一个司空见惯而又十分重要的问题,然而迄今还没有一本关于此课题的专著,系统而深入地将有关最新研究成果呈现在读者面前,使初学者容易入门,让饱学者有一块引玉之砖,这便是我们撰写此书的初衷。

写这样一本书,却需要鼓起勇气。回想从 1982 年起,我着手并持续进行这个问题的研究已有 26 年之久,其间有许多学生和同事参与,是应该有一个总结性的交代了,何况我的年龄已经越过青壮年的边界。幸好有了鄢社锋,作为我的学生和伙伴投入了这个课题的研究。他作为西北工业大学教改试点班的学生,于 1998 年自愿选择到本人名下做本科毕业设计,并做硕博连读。从那时起,他和我在一起前后有七年多时间。记得我建议给他的本科毕业设计课题是研究浅海中一个水听器垂直线列阵的空间增益,由于信号的多径效应引起的增益损失有多少,以及有什么办法可以减小这种损失。所以从一开始,他的学位课题就与阵列信号处理紧紧地联系在一起。鄢社锋的博士学位论文题目是《水听器阵列波束优化与广义空域滤波研究》,于 2005 年通过博士学位答辩,于 2008 年 5 月 22 日经教育部评选公布为年度全国百篇优秀博士学位论文之一。离开西北工业大学之后,鄢社锋到了中国科学院声学研究所做博士后,在侯朝焕院士的关心和支持下继续从事波束优化方向的工作。目前在挪威科技大学做博士后,在那里,Hovem 教授和董和风教授给予了同样的支持。尽管鄢社锋还很年轻,他在波束优化相关课题上的研究工作,也已经持续了十年之久。所以由他主笔,与我共同完成这本书是合适的,这在一定程度上具有集课题组过去工作之大成的意思。也许过些年后再看这本书,会发现许多不足之处。对此我的作为将会十分有限,而鄢社锋正值年轻,未来时间很长,一定会继续努力,争取新的发展。

在这里,我特别想说的是,像写书这样的事,尤其自称是一本专著,一定离不开前人的贡献,离不开研究群体的成果积累和各种各样的帮助。我不由得想起 1982 年的往事。那时我在英国 Loughborough 大学进修,指导老师是水声和雷达信号处理领域国际著名的专家 Griffiths 教授。有一天,他说有一个亟待解决的问题,就是在海底布放的水听器阵列中,如果有若干水听器失效,整个阵列就不能正常工作,损失会很大。他问:“你能不能研究一下,看看有没有什么好办法,使阵列基本上恢复正常工作?”我表示很高兴研究这个问题,并迅速提出一些可能的办法和初步的仿真计算结果。首先采用失效水听器数据内插的方法,但效果不够理想,后来

就把带有失效阵元的阵列当作一个新的、具有任意阵形的阵列来处理,这就导致了“任意结构形状传感器阵列方向图的最佳化”处理的初期研究结果。所以我在1984年《中国造船》学报正式发表“凹槽噪声场法”的论文,以及1985年在第四届通信数字信号处理国际会议(英国)的大会报告,都是与Griffiths教授联合署名的。俗话说,正确地提出问题,就解决了一半,我尊重他的贡献,感谢他指引我步入这样一个很有意思的问题。说实在的,虽然他已过世多年,但是在英国两年中与他每周一次从不间断的工作讨论,以及其他许多难忘的记忆仍然留在我的心中。

其后西北工业大学声学工程研究所的许多同事和学生和我一起,将“传感器阵列波束优化”作为长期方向不断开辟新的课题。这个方向的研究工作经久不衰,是因为存在强烈的应用需求,不断得到各方面的关心和支持,逐步在声呐研制中获得应用,同时又提出新的要求。杨士莪院士和原水声专业组的同仁陆佺人教授、姚蓝教授、过世的严福旺研究员等给予了长期的关心与帮助。在20世纪80年代中期之后的十几年中,有关科研成果获得过多项部级科技奖励和多项发明专利,在国内外期刊和学术会议发表了一批这方面的论文,包括在1991年布里斯班西太平洋国际声学会议的大会主题报告,在北京海洋声学国际会议的大会报告等。这些不可能在本书中一一奉献给读者,然而它是本书许多研究工作的先驱或基础。所以我必须说,对此做出过直接贡献的同事和学生主要有王英民、孙超、万春如、张燕武、吴仁彪、史新华、杨益新、张保嵩、肖国有、谢朝矩等,当然本人和鄢社锋亦在其中。还有其他许多老师,或提出过建议,或帮助完成实验数据的采集,或分担了本来应由本人承担的其他工作,在这里一并表示最诚挚的感谢。

鄢社锋的主要创造性贡献是,他将二阶锥规划技术引入到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。为了验证这些方法的可行性,以及便于对不同方法进行比较,他做了大量的设计计算,使我们有可能在本书中为读者提供大量的设计范例。关于阵列流形误差约束下的波束优化方法,是他最近在挪威工作期间提出的,我认为这是一个波束优化稳健性问题的新概念,今后一定会有新的发展。

以上简略说明了写作本书的背景和原委。由于时间安排上的关系,我对此项工作的回顾是粗糙的,对书稿的审改也不能面面俱到,疏漏之处在所难免,恭请读者批评指正。

马远良

2008年8月8日于西安

前 言

本书是一本阐述传感器阵列波束优化设计方法与应用的专著,属于阵列信号处理的范畴。书中大部分内容是根据作者近年的科研工作写成的,书中所涉及的方法大多是作者及合作者近年来提出并已在国内外重要期刊上公开发表的方法。此外,书中也介绍了部分国际上近年提出的其他方法。

阵列信号处理在声呐、雷达、无线通信、医学成像、地质勘探、射电天文学等多种领域具有广泛的应用,几十年以来一直是一个活跃的研究课题。波束形成是阵列信号处理的一个非常重要的任务,其处理过程为:采用空间分布的传感器阵列采集场(声场、电磁场等)数据,然后对所采集的阵列数据进行线性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。波束形成器可以是加权系数确定后不变的固定波束形成器,也可以是随应用环境变化不断进行自动调节的自适应波束形成器。

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。

波束形成器性能的优劣与否,可以从如下几个重要性能指标来考察:阵增益、稳健性、旁瓣级、主瓣宽度、主瓣响应、频率响应等。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,例如,在波束主瓣宽度与旁瓣级之间寻优的 Dolph-Chebyshev 波束形成,使理想阵增益最高的 Capon 波束形成,对阵列误差稳健的自适应波束形成,旁瓣控制波束设计,旁瓣控制自适应波束形成,期望响应波束设计,以及多指标波束优化设计,等等。由于波束形成器的这几个性能指标之间不是独立的,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。

根据所处理的数据的频带宽度进行划分,波束形成器分为窄带波束形成器与宽带波束形成器。窄带波束形成器一般有两种实现方法:一种是采用正交解调得到复包络后进行加权求和波束形成,另一种是采用相移波束形成。宽带波束形成器的实现包括频域 DFT 实现与时域 FIR 实现两种方式,DFT 波束形成是分块处理,FIR 波束形成是时序处理。对于前者,首先采用离散傅里叶变换将阵列数据分解为若干子窄带,然后针对每个子带进行窄带波束形成,最后对各子带输出进行逆傅里叶变换得到宽带波束输出时间序列。对于后者,将各通道数据分别通过一个

对应的 FIR 滤波器,再将每个滤波器输出相加,得到宽带波束输出序列。这些 FIR 滤波器的系数决定了波束形成器的空、频响应特性。

本书共分 8 章。第 1 章是绪论,介绍了阵列波束优化设计的历史与技术现状,以及本书的内容。第 2 章介绍阵列信号处理与波束形成的基本知识 with 数学模型。第 3 章至第 5 章介绍窄带波束形成器优化设计问题,这三章分别针对前面提到的波束形成器的各性能指标进行优化折中求解,获得满足设计要求的综合最优性能。其中第 3 章介绍稳健自适应波束形成问题,第 4 章介绍旁瓣控制波束设计问题,第 5 章介绍波束图综合的问题。第 6 章与第 7 章介绍宽带波束形成问题,其中第 6 章介绍宽带波束形成器的实现问题,包括频域 DFT 实现方法与时域 FIR 实现方法,第 7 章介绍 FIR 宽带波束形成器优化设计问题。第 8 章介绍目标方位估计方法,前面几章介绍的波束形成方法在这一章得到了具体应用。

本书初稿由鄢社锋执笔,马远良对稿件进行了仔细修改,书中纳入了两人近年来在国内外重要期刊合作发表的十余篇学术论文。书中融入了鄢社锋在西北工业大学攻读博士学位(指导教师为马远良院士)、在中国科学院声学研究所从事博士后研究(合作导师为侯朝焕院士)以及在挪威科技大学(Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet)从事博士后研究期间的大部分研究成果。

本书涉及的大部分研究工作是在西北工业大学声学工程研究所长期科研积累的基础上完成的,在此对学校有关部门、有关老师和同学深表感谢。

本书在写作过程中,得到了中国科学院声学研究所侯朝焕院士的支持与鼓励,他对本书的初稿提出了部分修改意见,在此表示感谢。本书涉及的研究工作受到了国家自然科学基金(No. 60602055)的资助,另一项国家自然科学基金还直接资助了本书的出版。

本书可供从事声呐、雷达、无线通信等信号处理专业的科学研究和工程技术人员学习参考,也可作为高等院校相关专业本科、研究生及教师的参考书。

限于著者的水平与经验,书中难免存在一些疏漏,恳请读者批评指正。

鄢社锋

2008 年 5 月

目 录

序言

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 目标方位估计	12
1.3 本书的结构	13
第 2 章 基本知识介绍	15
2.1 引言	15
2.2 数学模型	16
2.2.1 基阵	16
2.2.2 信号模型	16
2.2.3 噪声场模型	18
2.2.4 基阵接收数据模型	19
2.2.5 快拍数据模型	20
2.3 波束形成	23
2.3.1 波束形成表达形式	23
2.3.2 窄带波束形成及其性能参数	26
2.4 常见的波束形成器	33
2.4.1 常规波束形成器	33
2.4.2 MVDR 波束形成器	35
2.4.3 MVDR 波束形成器的稳健性	41
2.5 本章小结	47
第 3 章 稳健自适应波束形成	48
3.1 引言	48
3.2 样本协方差矩阵求逆法	49

3.3	对角加载法	53
3.4	加权向量范数约束法	62
3.4.1	加权向量范数约束与对角加载波束形成器的关系	62
3.4.2	范数约束波束形成器的二阶锥规划求解方法	64
3.4.3	范数约束波束形成器对角加载量求解法	64
3.5	最差性能最佳化法	70
3.6	协方差矩阵拟和法	72
3.7	双约束法	79
3.7.1	算法描述	79
3.7.2	尽可能小的椭圆不确定集	82
3.7.3	算例	82
3.8	各种波束形成方法性能比较	87
3.9	本章小结	92
第4章	旁瓣控制波束形成	94
4.1	引言	94
4.2	窗函数加权法	95
4.2.1	几种重要的窗函数	95
4.2.2	波束指向调整	99
4.3	凹槽噪声法	100
4.4	零点展宽技术	106
4.4.1	干扰方位扩展法	106
4.4.2	频带扩展法	108
4.4.3	协方差矩阵锥化法	109
4.5	最低旁瓣波束形成器	112
4.5.1	最低旁瓣波束设计	112
4.5.2	稳健最低旁瓣波束设计	116
4.6	旁瓣控制高增益波束形成器	118
4.6.1	低旁瓣自适应波束设计	118
4.6.2	旁瓣控制高增益波束设计	119
4.6.3	稳健旁瓣控制波束设计	121
4.7	抗阵列流形误差的稳健低旁瓣波束形成	125
4.7.1	问题描述	125
4.7.2	L_2 范数准则	126
4.7.3	L_1 范数准则	127
4.7.4	最差旁瓣下界	128

4.8	本章小结	133
第 5 章	波束图综合	135
5.1	引言	135
5.2	最小误差逼近法	136
5.2.1	问题描述	136
5.2.2	最小均方准则法	137
5.2.3	最小误差范数法	140
5.3	期望主瓣响应波束设计	142
5.3.1	问题描述	142
5.3.2	旁瓣控制主瓣最小误差逼近	143
5.3.3	主瓣精度约束最低旁瓣波束设计	144
5.3.4	窄带波束优化统一形式	146
5.4	恒定主瓣响应波束设计	148
5.4.1	宽带波束图	148
5.4.2	恒定主瓣响应波束图	149
5.5	期望主瓣幅度响应波束设计	154
5.5.1	问题描述	154
5.5.2	相位迭代法	154
5.5.3	分解迭代法	155
5.5.4	设计实例	158
5.6	本章小结	161
第 6 章	宽带波束形成器的实现	163
6.1	引言	163
6.2	频域 DFT 波束形成器	164
6.2.1	DFT 波束形成	164
6.2.2	另一种解释	167
6.2.3	分析与讨论	168
6.3	时域 FIR 波束形成器	173
6.4	基于 FFT 的 FIR 波束形成	175
6.5	FIR 波束形成器中的滤波器设计	178
6.5.1	最小加权误差准则	179
6.5.2	约束最小加权误差准则	182
6.6	FIR 波束形成器分步设计法	186
6.6.1	设计原理	186
6.6.2	时域宽带常规波束形成	188

6.6.3	恒定主瓣响应 FIR 波束形成器	191
6.6.4	旁瓣控制高增益 FIR 波束形成器	193
6.7	本章小结	194
第 7 章	宽带波束优化	196
7.1	引言	196
7.2	最小合成误差全局优化恒定主瓣响应 FIR 波束形成	197
7.2.1	分步设计法的局限性	197
7.2.2	FIR 宽带波束响应	198
7.2.3	恒定主瓣响应 FIR 波束形成器	200
7.3	宽带自适应 FIR 波束形成	206
7.3.1	数据协方差矩阵	206
7.3.2	自适应 FIR 波束形成器设计	208
7.3.3	旁瓣控制自适应 FIR 波束设计	211
7.4	最小差异恒定主瓣响应 FIR 波束形成	217
7.4.1	最小合成误差全局优化法的局限性	217
7.4.2	最小差异设计法	217
7.4.3	宽带 FIR 波束优化统一形式	226
7.5	几种宽带 FIR 波束设计方法比较	228
7.6	本章小结	228
第 8 章	目标方位估计	230
8.1	引言	230
8.2	窄带阵元域 MUSIC 方位估计	231
8.3	窄带矩阵空域预滤波方位估计	235
8.3.1	矩阵空域滤波原理	235
8.3.2	矩阵空域滤波器设计	236
8.3.3	空域预滤波 DOA 估计	238
8.3.4	方位估计步骤	239
8.4	窄带波束域方位估计	244
8.4.1	波束域方法	244
8.4.2	方位估计步骤	245
8.5	宽带非相干方位估计	248
8.6	宽带相干信号子空间方位估计	253
8.6.1	相干信号协方差矩阵的奇异性	253
8.6.2	相干子空间方位估计算法	254
8.6.3	相干子空间方位估计步骤	256

8.6.4 相干信号源方位估计的 Cramer-Rao 下界	257
8.7 宽带波束域方位估计	261
8.7.1 波束域方位估计方法简介	261
8.7.2 频域处理实现步骤	262
8.7.3 时域处理实现步骤	264
8.8 本章小结	271
参考文献	274
附录	287
A 二阶锥规划方法	287
A.1 二阶锥规划简介	287
A.2 二阶锥规划求解软件 SeDuMi	288
B 部分主要的符号说明	290
B.1 变量符号	290
B.2 部分算术符号	297
C 设计实例目录	298

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、射电天文学等多种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,天线阵既用来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^[1],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^[2]与高分辨导航雷达^[3]。Skolnik^[4]对雷达相控阵的应用有详细的描述,其他有关文献^[5,6]对雷达系统不同方面应用进行了论述。Gini 等人列出了截至 2000 年关于雷达信号处理方面的近 700 篇文献^[7]。

声呐系统也广泛应用阵列处理。Baggeroer^[8]、Knight^[9]与 Owsley^[10]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。Urlick 的著作^[11]是有关讨论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有关文献^[12-14]。

天线阵列也被用于无线通信系统^[15]。最早在 20 世纪 30 年代就被用于横跨大西洋进行短波通信^[16]。现在,天线阵列还用于卫星通信及无线手机通信^[17-21]。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^[22-24],地质勘探^[25-27]、射电天文学^[28-33]、麦克风阵列处理^[34-37]等多种领域。

从 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*^[38-40]、*IEEE J Oceanic Eng*^[41]与 *Proc IEEE*^[42])与综述^[43-49]。大量的关于阵列信号处理的研究论文除了发表在这里提到的几种期刊之外,比较多的还发表在 *IEEE Trans Signal Processing*、*IEEE Trans Aerosp Electron Syst*、*J Acoust Soc Am* 等期刊上。迄今,国外已经出版了阵列信号处理方面的重要专著^[50-60],国内也有部分相关著作^[61-64]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,其主要功能包括: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。

波束形成的处理过程为:采用空间分布的传感器阵列采集场(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。

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,抑制其他频率成分这一处理过程非常相似。因此,波束形成器也被称作空域滤波器^[45]。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是宽带波束形成器的特例。鄢社锋等最近对宽带波束形成器的设计与实现进行了综述^[65]。

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^[66]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)^[67],最大信噪比法波束形成器^[68],线性约束最小方差 (linearly constrained minimum variance, LCMV) 波束形成器^[69]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,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^[44]。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的最优性能。

波束形成器性能的优劣与否,可以从如下几个重要性能指标来考察:阵增益、稳健性、旁瓣级、主瓣宽度、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;高的阵增益提高系统对弱目标的检测能力;高的稳健性使波束形成的性能受各种失配的影响减小。波束优化设计就是致力于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。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^[66]。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^[70],后人也称为Capon波束形成器。Cox等人于1987年提出稳健自适应波束处理方法^[71],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,对波束形成器的性能进行改进。

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,或者说最大限度提高阵增益。该波束形成器具有较好的方位分辨力与较强的干扰抑制能力。

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,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^[72-75],阵形标定误差^[76],未知波前扭曲与信号衰减^[77-80],近场模型失配^[81],局部散射^[82-85],环境非平稳造成信号和噪声幅度与相位起伏^[86]等等。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^[87],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^[88,89]。

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^[68,90]。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,例如,被动声呐、无线通信、麦克风阵列与天文学等应用。

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^[91,92]。但是当训练数据中包含有期望信号时,传统的自适应波束形成方法就会产生信号自销现象,此时波束性能与收敛速率就会严重下降。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一样^[87]。输入信噪比越高,性能下降程度越剧烈。在高信噪比情况下,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 30 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^[69,91]与微分约束^[93-95]等,对信号到达方向的不确定性具有较好的稳健性^[93]。但是这种技术只能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。而且它会减少波束形成器的自由度,降低其干扰抑制能力。

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^[71,96,97]与基于特征空间的波束形成方法^[87,98-101]。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,而一般采用样本协方差矩阵对角加载波束形成方法^[50,71,101-105]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^[82-85]。

最近,Gershman^[106], Li^[107-109], Boyd^[110]等人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^[106,108,110]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^[111],能处理灵活的导向向量与协方差矩阵模型不确定性问题。

本书第3章将具体阐述稳健波束形成问题。

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个方面研究内容,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越来越受到人们的关注,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。在本书中,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。另一方面,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^[66]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^[112]。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^[112]。对于半波长间隔均匀线列阵,两方法相同;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^[113]和圆面阵^[114]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 方法进行了改进^[115],使旁瓣高度能个别指定。Villeneuve 将 Taylor 方法运用于离散