



阵列信号处理的
理论与应用

ZHENLIE XINHAO
CHULI DE
LILUN YU YINGYONG

(第2版)

张小飞 汪飞 陈伟华 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

013067227

TN911.7
144-2

阵列信号处理的理论与应用

(第2版)

张小飞 汪飞 陈伟华 著
徐大专 周建江 徐凌云



国防工业出版社

·北京·

TN911.7

144-2



北航

C1674690

P

10308125

内 容 简 介

阵列信号处理是信号处理领域的一个重要分支,用传感器阵列来接收空间信号,与传统的单个定向传感器相比,具有灵活的波束控制、高的信号增益、极强的干扰抑制能力及高的空间分辨力等优点,直接导致阵列信号处理具有重要的军事、民事应用价值和广阔的应用前景,并已应用于雷达、声纳、通信、地震勘探、射电天文及医学诊断等多种国民经济和军事应用领域。本书共分12章,主要内容包括波束形成、DOA估计、相干信号的DOA估计、二维DOA估计、宽带阵列信号处理、阵列多参数估计、稳健的麦克风阵列近场宽带波束形成等。本书全面介绍阵列信号处理的经典理论的同时,加强对近来一些新算法如PARAFAC、四元数理论等的介绍,同时介绍极化敏感阵列和声矢量传感器阵列等的应用。

本书适合通信与信息系统、信号和信息处理、微波和电磁场及水声等专业本科生的高年级学生和研究生学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

阵列信号处理的理论与应用/张小飞,汪飞,陈伟华著. —2版. —北京:
国防工业出版社, 2013.6
ISBN 978-7-118-08705-5

I. ①阵… II. ①张… ②汪… ③徐… III. ①信号处理 IV. ①TN911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第088442号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 20 字数 493 千字

2013年6月第1版第1次印刷 印数 1—2500册 定价 58.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 88540777

发行邮购:(010) 88540776

发行传真:(010) 88540755

发行业务:(010) 88540717

前 言

众所周知,信号处理的基本原则是尽可能地利用、提取和恢复包含于信号特征中的有用信息。在复杂的电磁环境中,对信号的参数进行有效地检测和精确的估计就显得尤其重要;在信号处理的发展历程中,信号处理技术最初是从一维时域信号处理中得到发展的。长期以来,人们在一维信号的检测和分析方面取得了许多重要的成果。进入 20 世纪 60 年代以来,研究人员开始将一维信号处理逐渐延伸到多维信号处理的领域中。通过传感器阵列或者天线阵列把时域采样变成时空采样,将时间频率变成空间频率(角度),从而将时域信号处理的许多理论成果推广到空域,开辟了阵列信号处理这一新的研究领域。阵列信号处理也就逐渐成为信号处理领域的一个重要分支,用传感器阵列来接收空间信号,与传统的单个定向传感器相比,具有灵活的波束控制、高的信号增益、极强的干扰抑制能力及高的空间分辨能力等优点,直接导致阵列信号处理具有重要的军事、民事应用价值和广阔的应用前景并已应用于雷达、声纳、通信、地震勘探、射电天文及医学诊断等多种国民经济和军事应用领域。

本书是关于阵列信号处理的专著,以阵列天线为研究对象,主要研究了波束形成、波达方向估计算法、阵列多参数估计及其应用。

本书的主要特色:

(1) 结构完整。近年来国内外虽然已经出版了几本涉及空间谱估计内容的优秀著作,但本书不仅包括空间谱估计,还覆盖了波束形成、阵列多参数估计和前沿发展。

(2) 内容广泛。由于阵列信号处理的理论丰富且应用广泛,为了写好此书,我们收集了大量的国内外文献资料,并做了精心组织,尽可能地反映出这一学科中的精华内容。对阵列信号处理中一些传统方法如 ESPRIT、MUSIC、Capon、PM、Capon、四阶累积量等做了详细的介绍,同时对一些新方法如四元数、PARAFAC 方法等进行了研究。

(3) 可读性强。对于许多读者来说,阵列信号处理所涉及的内容难学、难懂、难理解,尤其是专业论文不易读懂。本书注意了这一问题,尽量做到由浅入深,特别注重表达的清晰性、易懂性和可读性。为了便于读者阅读,书末还附有必要的数学知识和大量阵列信号处理方面的 MATLAB 程序供学生学习,本书光盘包含阵列信号处理中很多经典算法的 MATLAB 程序,共计 18 个,其中包含 LCMV 波束形成算法、LMS 自适应波束形成算法、Capon 算法、ESPRIT 算法、MUSIC 算法、PM 算法、前向预测、Root-MUSIC 算法、Unitary-ESPRIT 算法、2D-MUSIC 算法、四元数 MUSIC 算法、UCA-ESPRIT 算法、信源数估计 MDL 算法和角度和时延联合估计的 MATLAB 程序。同时还开发了阵列信号处理中 DOA 估计演示平台便于学习。

对《阵列信号处理的理论和应用》教材的修订,为南京航空航天大学“十二五”第一批规划教材建设项目。本书对原教材近 40% 内容进行了修订:①修改原教材中的一些错误;②增加一些新的内容,完善理论体系;③提升著作的创新性。在本书中,增加了稳健的麦克风阵列近场宽带波束形成章节;对二维 DOA 估计、声矢量传感器阵列的 DOA 估计等章节进

行了丰富。增加双四元数算法、降维 MUSIC 算法、级联 MUSIC 算法、DOA 矩阵方法、SUMWE 方法等，同时还增加了算法性能分析。

本书自 2011 年开始动笔至 2013 年完成，写作历经两年。在写作过程中，参考了大量的著作和论文，在此对作者们表示衷心的感谢。本书得到国家自然科学基金（60801052、61071164、61271327），江苏省博士后科研资助计划项目（1201039C），中国博士后基金（2012M521099），厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室开放课题，智能无线通信湖北省重点实验室开放课题（IWC2012002），无损检测技术教育部重点实验室（南昌航空大学）开放基金课题，近代声学教育部重点实验室（南京大学）开放基金课题和中央高校基本科研业务费专项（NZ2012010）和南京航空航天大学教改项目资助。

本书由张小飞教授、汪飞博士、陈伟华教授、徐大专教授、周建江教授和徐凌云博士执笔。汪飞博士负责第 9 章和附录；陈伟华教授负责第 10 章；徐凌云博士负责第 8 章部分内容；其他内容由张小飞教授、徐大专教授和周建江教授共同完成。在本书写作过程中，还得到了冯宝、王大元、余俊、是莺、冯高鹏、孙中伟、陈未央、李建峰、吴海浪、陈晨、黄殷杰、王方秋、陈翰、杨刚、曹仁政、余骅欣等历届硕士研究生和博士研究生的帮助。

由于水平有限，加之这一领域仍然处于迅速发展，书中不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2013 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1	2.6 信源数估计算法	26
1.1 研究背景	1	2.6.1 特征值分解方法	26
1.2 阵列信号处理的发展史及现状	1	2.6.2 信息论方法	27
1.2.1 波束形成技术	1	2.6.3 平滑秩序列法	28
1.2.2 空间谱估计方法	4	2.6.4 盖氏圆方法	29
1.2.3 阵列多参数估计	5	2.6.5 正则相关技术	30
1.3 本书的内容	7	参考文献	31
参考文献	8	第 3 章 波束形成算法	33
第 2 章 阵列信号处理基础	14	3.1 波束形成定义	33
2.1 矩阵代数的相关知识	14	3.2 常用的波束形成算法	33
2.1.1 特征值与特征矢量	14	3.2.1 波束形成原理	33
2.1.2 广义特征值与广义特征矢量	14	3.2.2 波束形成的最佳权矢量	35
2.1.3 矩阵的奇异值分解	14	3.2.3 波束形成的准则	37
2.1.4 Toeplitz 矩阵	15	3.3 自适应波束形成算法	38
2.1.5 Hankel 矩阵	15	3.3.1 自适应波束形成的最佳权 向量	38
2.1.6 Vandermonde 矩阵	15	3.3.2 权矢量更新的自适应算法	40
2.1.7 Hermitian 矩阵	16	3.4 广义旁瓣相消 (GSC) 的波束 形成算法及其改进	41
2.1.8 Kronecker 积	16	3.4.1 GSC 算法	41
2.1.9 Khatri-Rao 积	16	3.4.2 GSC 的改进算法	42
2.2 信号模型	16	3.5 基于投影分析的波束形成	43
2.2.1 窄带信号	16	3.5.1 基于投影的波束形成	43
2.2.2 相关系数	17	3.5.2 基于斜投影的波束形成算法	44
2.2.3 噪声模型	17	3.6 过载情况下的自适应波束 形成算法	46
2.3 阵列天线的统计模型	17	3.6.1 信号模型	47
2.3.1 前提及假设	17	3.6.2 近似最小方差法波束形成器	47
2.3.2 阵列的基本概念	18	3.6.3 阵列固有的协方差矩阵的 求解	48
2.3.3 天线阵模型	19	3.7 基于高阶累积量的波束 形成算法	48
2.3.4 阵列的方向图	19		
2.3.5 波束宽度	20		
2.3.6 分辨率	21		
2.4 阵列响应矢量/矩阵	21		
2.5 阵列协方差矩阵的特征分解	24		

3.7.1	阵列模型	49	4.2.1	数据模型	74
3.7.2	利用高阶累积量方法估计 期望信号的方向矢量	49	4.2.2	Capon 算法	74
3.7.3	基于高阶累积量的盲波束 形成	50	4.2.3	改进的 Capon 算法	75
3.8	基于周期平稳性的波束 形成算法	50	4.2.4	Capon 算法的均方误差分析	76
3.8.1	阵列模型与信号周期平稳性	50	4.3	MUSIC 算法及其修正算法	78
3.8.2	CAB 类盲波束形成算法	51	4.3.1	MUSIC 算法	78
3.9	基于恒模的盲波束形成算法	53	4.3.2	MUSIC 算法的推广形式	79
3.9.1	信号模型	53	4.3.3	MUSIC 算法性能分析	80
3.9.2	随机梯度恒模算法	53	4.3.4	求根 MUSIC 算法	83
3.9.3	最小二乘恒模算法 (LS-CMA)	54	4.3.5	求根 MUSIC 算法性能	83
3.10	自适应对角线加载的波束 形成算法	55	4.4	最大似然法	84
3.10.1	问题的提出	56	4.4.1	确定性最大似然法	84
3.10.2	自适应对角线加载 波束形成算法	57	4.4.2	随机性最大似然法	85
3.11	变换域波束形成技术	58	4.5	子空间拟合算法	86
3.11.1	基于频域的自适应波束形成 算法	58	4.5.1	信号子空间拟合	87
3.11.2	小波域自适应波束形成 算法	62	4.5.2	噪声子空间拟合	88
3.12	鲁棒的自适应波束成形	63	4.5.3	子空间拟合算法性能	88
3.12.1	对角加载方法	64	4.5.4	子空间拟合算法的实现	90
3.12.2	基于特征空间的方法	65	4.6	基于特征空间的 DOA 估计 算法	95
3.12.3	贝叶斯方法	65	4.6.1	信号模型	95
3.12.4	基于最坏情况性能优化的 方法	66	4.6.2	基于特征空间的 DOA 估计 算法	96
3.12.5	基于概率约束的方法	66	4.7	ESPRIT 算法及其修正算法	97
参考文献		67	4.7.1	ESPRIT 算法的基本模型	97
第 4 章 DOA 估计算法		71	4.7.2	LS-ESPRIT	100
4.1	前向预测算法、最大熵算法和 最小模算法	71	4.7.3	TLS-ESPRIT	101
4.1.1	前向预测算法	71	4.7.4	SLS-ESPRIT	102
4.1.2	最大熵算法	72	4.7.5	酉 ESPRIT	103
4.1.3	最小模算法	73	4.7.6	ESPRIT 算法理论性能	106
4.2	Capon 算法和性能分析	74	4.8	基于四阶累积量的 DOA 估计	108
			4.8.1	四阶累积量与二阶统计量 之间的关系	109
			4.8.2	四阶累积量的阵列扩展 特性	110
			4.8.3	MUSIC-like 算法	111
			4.8.4	Virtual-ESPRIT 算法	111
			4.9	旋转不变传播算子 PM	113
			4.9.1	算法描述	113
			4.9.2	误差分析	114

4.10 谱峰搜索传播算子和性能分析	114	6.4.1 阵列结构与信号模型	145
4.10.1 用于信号方位估计的谱峰搜索传播算子	114	6.4.2 基于 MEMF 的二维 DOA 估计算法	145
4.10.2 传播算子算法和线性预测算法之间的关系	117	6.5 均匀圆阵中的二维 DOA 估计	148
4.10.3 传播算子算法性能分析	118	6.5.1 数据模型	148
参考文献	120	6.5.2 波束空间转换	148
第 5 章 相干信源 DOA 估计	123	6.5.3 UCA-RB-MUSIC 算法	149
5.1 相干信源 DOA 估计的发展	123	6.5.4 UCA-Root-MUSIC 算法	149
5.2 空间平滑算法	124	6.5.5 UCA-ESPRIT 算法	150
5.3 改进的 MUSIC 算法 (IMUSIC)	125	6.6 平面阵中几种二维 DOA 估计算法	150
5.4 基于 Toeplitz 矩阵重构的 ESPRIT-Like 算法	126	6.6.1 接收信号模型	150
5.5 无需特征值分解的相干 DOA 估计的子空间方法	127	6.6.2 二维 MUSIC 算法	151
5.5.1 数据模型	127	6.6.3 二维 Capon 算法	152
5.5.2 无需特征值分解的相干 DOA 估计的子空间方法——SUMWE 算法	128	6.6.4 二维求根 MUSIC 算法	153
5.6 任意阵列下的相干信号 DOA 估计	132	6.6.5 二维 ESPRIT 及二维 Unitary-ESPRIT 算法	153
参考文献	134	6.6.6 二维传播算子算法	158
第 6 章 二维 DOA 估计	135	6.6.7 PARAFAC 技术	160
6.1 引言	135	6.6.8 本节小结	162
6.2 L 型阵列中基于移不变的盲二维 DOA 估计	136	6.7 均匀矩形面阵中降维 MUSIC 的二维 DOA 估计方法	163
6.2.1 数据模型	136	6.7.1 数学模型	163
6.2.2 基于移不变性的改进的二维 DOA 估计	137	6.7.2 降维 MUSIC (RD-MUSIC) 算法	163
6.3 L 型阵列下 PARAFAC 二维 DOA 估计	139	6.7.3 性能分析	166
6.3.1 数据模型	139	6.7.4 仿真结果	167
6.3.2 二维 DOA 盲估计	141	6.8 L 型阵列下低复杂度的二维 DOA 估计算法	168
6.3.3 仿真结果	144	6.8.1 数据模型	168
6.4 基于增广矩阵束的 L 型阵列的二维 DOA 估计	144	6.8.2 无需特征值分解的二维 DOA 估计算法	169
		6.9 DOA 矩阵方法的二维 DOA 估计	173
		6.9.1 阵列结构及信号模型	173
		6.9.2 DOA 矩阵方法	173
		6.10 双平行均匀线阵中基于 PM 算法的二维 DOA 估计算法	174
		6.10.1 数据模型	174
		6.10.2 角度估计算法	175

6.10.3	误差分析和 Cramer-rao 界 (CRB)	177	8.5.1	数据模型	206
6.10.4	仿真结果	181	8.5.2	联合角度—时延估计问题	207
	参考文献	182	8.5.3	联合角度—时延估计的 ESPRIT 算法	208
第 7 章	宽带阵列信号处理基础	184	8.6	基于四线性分解的阵列信号二维角度和频率联合估计算法	211
7.1	引言	184	8.6.1	数据模型	211
7.2	宽带阵列信号处理基础	185	8.6.2	算法描述	213
7.2.1	宽带信号的概念	185	8.6.3	仿真和分析	215
7.2.2	阵列信号模型	185		参考文献	216
7.3	宽带信号源的 DOA 估计	186	第 9 章	四元数理论在阵列信号处理中的应用	218
7.3.1	非相干信号子空间方法	186	9.1	概述	218
7.3.2	相干信号子空间 (CSM) 方法	187	9.2	四元数在二维 DOA 估计中的应用	218
7.3.3	聚焦矩阵的构造方法	188	9.3	四元数在联合角度频率估计中的应用	221
	参考文献	190	9.4	四元数在色噪声矢量阵列信号处理中的应用	222
第 8 章	阵列多参数估计	192	9.5	基于双四元数理论的三分量矢量传感器阵列参量联合估计	224
8.1	引言	192	9.5.1	线性均匀一致的三分量矢量传感器阵列的双四元数模型	225
8.2	角度和频率估计的 ESPRIT 算法	193	9.5.2	信源波达方向和极化参量的联合估计	226
8.2.1	数据模型	193		参考文献	227
8.2.2	角度和频率联合估计	194	第 10 章	稳健的麦克风阵列近场宽带波束形成	229
8.2.3	仿真结果	196	10.1	概述	229
8.3	基于三线性分解的盲角度和频率估计算法	196	10.1.1	稳健的麦克风阵列固定权波束形成	230
8.3.1	数据模型	196	10.1.2	稳健的麦克风阵列自适应波束形成	231
8.3.2	三线性模型和分解	198	10.2	基于凸优化的稳健近场宽带波束形成器设计	232
8.3.3	联合角度和频率估计	199	10.2.1	经典 minimax 设计方法	232
8.4	基于 PM 的联合频率和角度估计	200	10.2.2	基于凸优化的稳健设计方法	233
8.4.1	数据模型	200			
8.4.2	基于传播算子的波达方向和频率联合估计方法	202			
8.4.3	基于改进传播算子的波达方向和频率联合估计方法	203			
8.4.4	误差分析	204			
8.4.5	仿真实验	205			
8.5	联合角度和时延估计的 ESPRIT 方法	206			

10.2.3	设计实例	237	11.8.1	数据模型	270
10.3	稳健近场自适应波束形成	240	11.8.2	声矢量传感器阵的二维 DOA 角度估计	271
10.3.1	点约束近场自适应波束形成	240	11.8.3	性能分析	273
10.3.2	自校准稳健近场自适应波束形成	242	11.8.4	仿真结果	275
10.3.3	仿真结果	244	参考文献		276
10.4	本章小结	246	第 12 章	极化敏感阵列信号处理	278
参考文献		247	12.1	引言	278
第 11 章	声矢量传感器阵列的 DOA 估计	250	12.1.1	研究背景	278
11.1	引言	250	12.1.2	极化敏感阵列的国内外研究现状分析	278
11.2	基于多不变 MUSIC 算法的声矢量传感器阵的 DOA 估计	251	12.2	极化敏感阵中 PARAFAC 信号检测法	280
11.3	基于 ESPRIT 算法的任意声矢量传感器阵列的二维 DOA 估计	253	12.2.1	信号接收模型	280
11.4	基于三线性分解的任意声矢量传感器阵列的二维 DOA 估计	256	12.2.2	PARAFAC 接收算法	281
11.5	基于 PM 的声矢量传感器阵二维 DOA 估计算法	258	12.3	极化敏感阵的 PARAFAC 的 DOA 和极化估计算法	282
11.5.1	数据模型	258	12.3.1	DOA 估计	282
11.5.2	算法推导	258	12.3.2	极化估计	283
11.5.3	仿真	260	12.4	极化敏感阵列中基于降维 MUSIC 的盲 DOA 和极化估计	284
11.6	单快拍下声矢量传感器阵二维相干 DOA 估计算法	261	12.4.1	数据模型	284
11.6.1	数据模型	261	12.4.2	DOA 和极化估计算法	284
11.6.2	算法推导	262	12.4.3	仿真结果	287
11.6.3	仿真	265	参考文献		288
11.7	声矢量传感器阵下非圆信号二维 DOA 估计算法	265	附录		291
11.7.1	数据模型	266	附录 A	信号处理方法的有关数学基础	291
11.7.2	算法推导	266	附录 A1	高阶统计量	291
11.7.3	仿真	269	附录 A2	循环统计量	295
11.8	声矢量传感器阵中基于级联 MUSIC 的二维 DOA 角度估计	269	附录 A3	四元数和四元数矩阵	298
			附录 A4	PARAFAC 技术的数学基础	304
			附录 B	阵列信号处理算法	307
			附录 C	Matlab 程序 (在附属光盘中)	307
			符号说明		309

第1章 绪 论

1.1 研究背景

阵列信号处理作为信号处理的一个重要分支,它在通信、雷达、声纳、地震勘探和射电天文等领域内获得了广泛应用和迅速发展^[1-4]。阵列信号处理将一组传感器按一定方式布置在空间不同的位置上,形成传感器阵列。用传感器阵列来接收空间信号,相当于对空间分布的场信号采样,得到信号源的空间离散观测数据。阵列信号处理的目的是通过对阵列接收的信号进行处理,增强所需要的有用信号,抑制无用的干扰和噪声,并提取有用的信号特征及信号所包含的信息。与传统的单个定向传感器相比,传感器阵列具有灵活的波束控制、高的信号增益、极强的干扰抑制能力及高的空间分辨能力等优点,这也是阵列信号处理理论近几十年来得以蓬勃发展的根本原因。

自适应阵列信号处理所研究的主要问题如下:

- (1) 波束形成技术。使阵列天线方向图的主瓣指向所需的方向。
- (2) 零点形成技术。使天线的零点对准干扰方向。
- (3) 空间谱估计。对空间信号波达方向的分布进行超分辨估计。
- (4) 信号源定位。确定阵列到信源的仰角和方位角,甚至频率、时延和距离等。
- (5) 信源分离。确定各个信源发射的信号波形。各个信源从不同方向到达阵列,这一事实使得这些信号波形得以分离,即使它们在时域和频域是叠加的。

1.2 阵列信号处理的发展史及现状

阵列信号处理的发展史最早可追溯到 20 世纪 40 年代的自适应天线组合技术,它使用锁相环进行天线跟踪。阵列信号处理的重要开端是由 Howells 于 1965 年提出了自适应陷波的旁瓣对消器^[5]。1976 年,Applebaum^[6]提出了使信号干扰噪声比(SINR)最大化的反馈控制算法。另一个显著的进展是 Widrow^[7]于 1967 年提出的最小均方(LMS)自适应算法。其他几个里程碑式的工作是 Capon 于 1969 年提出的恒定增益指向最小方差波束形成器^[8],Schmidt 于 1979 年提出的多重信号分类(MUSIC)方法^[9],Roy 等于 1986 年发展的估计信号参数的旋转不变技术(ESPRIT)^[10],Gabriel^[11]则是对自适应波束形成提出“智能阵列”(Smart Array)术语的第一人。1978 年,在军用通信系统中使用了自适应天线^[12],在民用蜂窝式通信中使用天线阵列是在 1990 年开始的^[13]。

1.2.1 波束形成技术

波束形成(BF)也称空域滤波,是阵列处理的一个主要方面,已逐步成为阵列信号处理的标志之一,其实质是通过对各阵元加权进行空域滤波,来达到增强期望信号、抑制干扰的目的;

而且可以根据信号环境的变化自适应地改变各阵元的加权因子。自从提出自适应天线这个术语以来,自适应天线发展至今已有 50 多年了,其研究的重点一直是自适应波束形成算法,而且经过前人的努力,已经总结出许多好的算法。自适应阵列的优良性能是通过自适应算法来实现的,有多种准则来确定自适应权。它们包括:最小均方误差(MSE)准则;最大 SINR 准则;最大似然比(ML)准则;最小噪声方差准则。在理想情况下,这 4 种准则得到的权是等价的。因此在自适应算法中选用哪一种性能度量并不重要,而选择什么样的算法来调整阵波束方向图进行自适应控制才是非常重要的。自适应算法主要分为闭环算法和开环算法,早期注重闭环算法的研究,主要的闭环算法有 LMS 算法、差分最陡下降算法、加速梯度算法及其变型算法。

(1) 广义旁瓣相消器(GSC)是线性约束最小方差准则(LCMV)的一种等效的实现结构,GSC 结构将自适应波束形成的约束优化问题转换为无约束的优化问题,分为自适应和非自适应两个支路,分别称为主支路和辅助支路,要求期望信号只能从非自适应的主支路通过,而自适应的辅助支路中仅含有干扰和噪声分量,其自适应过程可以克服传统方法中期望信号含于协方差矩阵引起的信号对消问题。正如文献[67]中所指出的那样,由于阵列天线误差的存在,GSC 的阻塞矩阵并不能很好地将期望信号阻塞掉,而使其一部分能量泄露到辅助支路中,当信噪比较高的时候,辅助支路中也含有相当的期望信号能量,会出现严重的上、下支路期望信号抵消的现象,文献[67]将泄露的期望信号功率作为惩罚函数,提出了人工注入噪声的方法,使 GSC 具有稳健性,人工注入的噪声必须具有合适的功率,文献[68]利用自适应权向量的范数小于一定的值,同样可以提高 GSC 的稳健性。文献[76]提出了信号子空间投影的 GSC 改进算法,来提高 GSC 的稳健性,但在低信噪比下发生波束形成畸变。本书中将提出一种改进的 GSC 的波束形成方法,即基于特征结构的 GSC 算法(ES-GSC),该算法不仅克服了传统 GSC 算法在高信噪比下波束形成效果变差的缺点,而且克服了文献[76]中提出的改进 GSC 算法在低信噪比下性能差的缺点。

(2) 对角线加载方法。常用的 LCMV 算法也是一种 SMI 算法。但是在 SMI 实际运用中,由于各种误差的影响会导致副瓣电平升高,主瓣偏移,波束畸变,输出 SINR 下降。文献[73]分析了加载量对自适应阵列干扰噪声比的影响;文献[74]提出了对角线加载的波束形成方法来抑制方向图畸变。对角线加载技术削弱了小特征值对应的噪声波束的影响,改善了方向图畸变,但是加载量的确定一直以来是一个比较困难的问题。文献[80]提出了一种自适应的对角线加载的波束形成方法。

(3) 投影方法。为了克服 LCMV 算法对指向误差的敏感性,人们又提出了基于特征空间(ESB)波束形成算法^[61-64],其权矢量是由 LCMV 波束形成器的最优权矢量向信号相关矩阵特征空间作投影得到的,该算法比 LCMV 算法有更好的性能,具有更快的收敛速度和更强的稳健性。虽然 ESB 算法不像 LCMV 算法那样对指向误差敏感,但当指向误差较大时,ESB 算法的性能也会急剧变差,尤其是当阵列孔径较大时,很小的指向误差也会使 ESB 算法性能下降,文献[65]提出一种改进的 ESB 自适应波束形成算法在指向误差较大时,仍能有较好的性能。该算法主要是利用阵列接收数据来校正 ESB 算法的约束导向矢量,使该导向矢量尽可能地接近期望信号的导向矢量,从而提高波束形成器的性能。ESB 自适应波束形成算法的前提是必须知道信号源的数目^[64],估计信号源数的主要方法有 AIC 和 MDL 法。另外,ESB 算法一般处理的都是信号不相干的情况,当信号相干时,ESB 算法和空间平滑或 Toeplitz 化等解相关技术结合起来,同样可以达到好的效果。此外,在这些基本算法的基础上,文献[69]提出了一种基于广义特征空间的波束形成器。文献[70]提出了正交投影方法(OP);文献[71, 72]

提出了一种基于酉变换的谱估计方法,已成功应用于波达方向估计中。文献[56]提出了利用投影算子对阵列数据进行降维处理,在一定程度上降低了运算量,同时提高了自适应波束的稳健性,其投影算子是根据目标和干扰的粗略估计,以及不完全的阵列流型知识得到的。当相关矩阵中含有期望信号时,导致输出 SINR 下降,波形畸变较严重。另外,当存在系统误差和背景噪声为色噪声时,该方法虽然能够减小协方差中的扰动量,但副瓣电平还会出现一定程度的升高以及主瓣发生偏离现象。文献[57, 58]提出的 ESB 的自适应波束形成算法,其权向量是在线性约束最小方差准则下的最优化权,向信号相关矩阵的特征空间作投影得到的。文献[59]提出了一种改进的自适应波束形成算法,该算法根据期望信号输入的大小,进行不同的处理,同时在存在相关或者相干干扰时仍具有较好的抑制性能和波束保形能力,从而大大提高了波束形成的稳健性。文献[78, 79]利用投影算子可以改善波束形成的稳健性,但投影方法在相干信源情况下性能下降,而且投影算子需要知道期望信号和干扰信号的方向矢量,这在实际系统中很难满足。斜投影算子是投影算子的扩展,文献[81]研究基于斜投影的波束形成算法,它对接收信号进行斜投影可有效消除干扰,进而提高波束形成的鲁棒性。

(4) 变换域的自适应滤波方法。LMS 自适应波束形成算法是一种较简单、实用的自适应波束形成算法。LMS 的优点是结构简单,算法复杂度低,易于实现,稳定性高;缺点主要是收敛速度较慢,因而其应用也受到一定的限制。分析表明,影响 LMS 自适应波束形成器收敛速度的主要因素是输入信号的最大、最小特征值之比,该值越小收敛就越快^[86]。为了提高收敛速度和性能,将研究变换域的自适应滤波方法。文献[87~89]研究了频域的波束形成技术;文献[90]研究了基于余弦变换的波束形成技术。作者改进了频域自适应波束形成算法^[92],并提出了小波域和小波包变换的自适应波束形成算法^[83,93,94,95]。

(5) 鲁棒自适应波束形成技术。目前,人们普遍关注在阵列响应矢量未知情况下,自适应波束形成问题,即盲自适应波束形成技术^[3,14-16]。造成阵列响应矢量未知的原因是期望信号源的波束方向未知,或天线阵列特性不确定,或不恰当的模型和在信号源与天线阵列之间传播介质的变化。为了提高对未知阵列响应矢量的鲁棒性,一些学者提出许多方法,如对角线加载波束形成^[14]、基于测向技术的波束形成^[15]和基于贝叶斯方法的鲁棒自适应波束形成^[16]等,这些方法在一定程度上都能够提高算法的鲁棒性。

(6) 盲自适应波束形成技术。近来人们提出了许多盲波束形成算法,它们的共同特点在于不需要阵列校验、DOA、训练序列、干扰和噪声的空间自相关矩阵等先验知识。目前,盲波束形成主要有 3 类:基于常模量(CM)的算法;基于高阶累积量的方法;基于周期平稳的算法。常模量算法利用信号的常模量特性提取有用信号,但是它采用的代价函数不能保证算法收敛到全局最小点。由于基于高阶累积量的方法是利用信号的高阶统计特性,它能够去除任何高斯噪声;但是,它对于非高斯干扰信号的处理却比较困难。同时,算法的收敛速度过慢,运算复杂。基于信号周期平稳特性的算法有许多优点,因为绝大多数通信信号是周期平稳的,并且很容易找出它们之间不同的周期平稳频率。基于周期平稳信号特性的盲自适应波束形成方法是当前国际上阵列信号处理领域研究的热点,其新算法层出不穷^[29]。

(7) 阵列天线误差分析。阵列天线自适应波束形成技术在理论上具有十分优良的性能,但是在实际应用中却不尽如人意,究其原因是在阵列天线不可避免地存在各种误差(如阵元响应误差、通道频率响应误差、阵元位置扰动误差、互耦等),各种误差可以综合用阵元幅相误差来表示。近年来,许多文章从不同侧面分析了阵列误差对自适应阵性能的影响。文献[66]对各种误差的影响进行了分析综述。

1.2.2 空间谱估计方法

阵列信号处理的另一个基本问题是空间信号到达方向 (Direction of Arrival, DOA) 的问题,也是雷达、声纳等许多领域的重要任务之一。DOA 估计的基本问题就是确定同时处在空间某一区域内多个感兴趣信号的空间位置 (各个信号到达阵列参考阵元的方向角,简称波达方向)。波束形成实质上也是一个波达方向估计问题,只不过它们都是非参数化的波达方向估计器。这些估计的分辨率则决定于阵列长度。阵列长度确定后,其分辨率也就被确定,称为瑞利限。超瑞利限的方法称为超分辨率方法。最早的超分辨率 DOA 估计方法是著名的 MUSIC 方法 (及改进算法^[96-100]) 和 ESPRIT 方法,它们同属特征结构的子空间方法。子空间方法建立在这样一个基本观察之上:若传感器个数比信号个数多,则阵列数据的信号分量一定位于一个低秩的子空间。在一定条件下,这个子空间将唯一确定信号的波达方向,并且可以使用数值稳定的奇异值分解精确地确定波达方向。由于把线性空间的概念引入到 DOA 估计中,子空间方法实现了 DOA 估计分辨率的突破。人们从各个方面发展和完善子空间估计方法。一些学者提出加权子空间拟合方法^[17-21]。这个方法的特点是根据一些准则,构造子空间的加权阵,然后重新拟合子空间,以达到某种性能指标的最优。但是,加权子空间拟合方法构造加权阵时,需要参数寻优,因此,计算复杂,通用性差。殷勤业等提出了 DOA 矩阵法^[22]。此方法根据阵列输出的协方差矩阵的性质,构造了 DOA 矩阵,然后对 DOA 矩阵进行特性分解,可以直接获得空间谱的全部信息,从而完全避免了多项式搜索,减少了计算量。此方法属于二维参数估计方法,可以同时估计信号的二维方向角。由于此方法计算量小、参数能够自动匹配等特点,而引起人们的重视。如文献[23,24]利用 DOA 矩阵法,实现信号频率和 DOA 的同时估计。但是,DOA 矩阵法也存在一些缺点,如不允许任意两个信号源有相同的二维方向角,否则算法将出现病态,称为“角度兼并”问题。因此,金梁等提出了时空 DOA 矩阵法^[25,26]。该方法在保持原 DOA 矩阵法无需二维谱峰搜索和参数自动配对等优点的基础上,利用阵元输出之间的互相关关系将空域的阵列观测数据变换到时空域,解决了“角度兼并”问题,并通过空时二维处理在时空域中衍生出大量虚拟阵元,从而大大减弱了传统方法中对阵列结构、排布方式和阵元一致性的约束,不需要匹配子阵,无冗余阵元与孔径损失,并适用于阵元排列不规则的阵列。

由于高阶累积量对高斯噪声不敏感,一些学者利用阵列输出的高阶累积量 (通常是 4 阶累积量) 代替 2 阶累积量进行空间谱估计^[27,28]。利用高阶累积量估计空间谱的另一个好处是合成阵列的阵元数较实际阵元数多,即阵列扩展特性。但是,高阶累积量对非高斯噪声无能为力,并且计算量较大。因此又发展出以下几种方法。

(1) 基于信号周期平稳特性的空间谱估计方法。大部分人造信号具有循环平稳特性,具有相同循环频率的信号有可能循环相关,不同循环频率的信号循环互相关为零。Cardner 等首先用循环互相关矩阵代替互相关矩阵,通过信号子空间拟合进行 DOA 估计^[30],此方法的主要优点是抑制干扰信号和噪声能力强,具有信号选择能力,并可增加阵列容量。对于宽带信号,很难用该方法正确估计 DOA。目前,在雷达系统中,随着反隐形及对目标的高分辨率的要求不断提高,窄带信号的假设已经不符合实际情况。在通信中,FM、BPSK 调制方式的使用也使窄带假设不成立。谱相关空间拟合 (SC-SSF) 方法^[31]较好地解决了宽带问题。SC-SSF 方法通过对阵列各阵元输出信号进行循环自相关运算,得到一个基于循环自相关的信号模型,然后利用 MUSIC 算法实现对信号源的 DOA 估计。在此基础上,文献[32]将 SC-SSF 方法扩

展到相干信号源的 DOA 估计。文献[33]将循环谱进行加权处理,得到了基于加权循环谱的 DOA 估计方法。文献[34]提出了基于循环互相关的 DOA 估计方法,这些方法都是对 SC-SSF 的改进。金梁等经过进一步研究,提出了广义谱相关子空间拟合 DOA 估计方法^[35],此方法将主要的循环平稳 DOA 估计方法统一起来,并揭示它们之间的内在联系。循环平稳 DOA 估计方面新的研究成果仍是不断出现^[36,37]。

(2) 基于空时频三维子空间的空间谱估计方法。随着阵列信号处理理论研究不断深入,非平稳信号的波达方向估计也成为了阵列信号处理领域研究的重点内容。因为在实际应用中,许多典型信号是非平稳的或谱时变的,如雷达中的线性调频信号、通信中的跳频信号等。而传统的子空间 DOA 估计方法是针对平稳信号。因此,利用传统子空间方法对非平稳信号进行 DOA 估计,显然存在先天性不足。在许多场合中,信号的一些先验知识是可以利用的。那么,如何利用信号的一些先验知识,在空、时、频三维子空间内,对信号进行处理是国内外阵列信号处理领域研究的热点问题^[38-43]。众所周知,联合时频分析是对非平稳信号或谱时变信号进行处理的有效手段,将时频分析的方法与阵列信号处理相结合,通过时频分析将信号变换到时频域,利用时变滤波提高空间谱估计的性能。由于将一维时域信号映射到二维时频域中,因此能够在空、时、频三维空间中更精细、更准确地刻画和反映非平稳信号的特征和细节,利用时变滤波等方法,将一些在低维空间中难以区分的,但具有不同时频特征的信号加以分离,同时有效地抑制干扰,使得 DOA 估计方法具有信号选择性以及更高的分辨率和更强的抗干扰、噪声的能力,此方法既适用于平稳信号又适用于时变、非平稳信号的 DOA 估计。

(3) 扩展信号源的空间谱估计方法。在阵列成像、声源定位,海下回波探测,对流层、电离层无线电传播,低仰角雷达目标跟踪,移动通信等领域,目标信号源具有分布特性。假设在移动通信中,由于移动信号源周围的局部散射,使得以同一个信号源发出的信号可以通过不同的途径和角度到达天线接收阵列。这时,信号源已不是点信号源,它通常被认为是具有分布特性的角度扩展信号。基于点信号源假设的高分辨 DOA 估计方法,由于未能考虑信号源的空间分布信息,当点信号源假设不再成立时,其 DOA 估计性能急剧下降。因此,扩展信号源的 DOA 估计也是国内外阵列信号处理领域的研究热点^[44,45]。一些学者基于局部角度扩展源的协方差矩阵模型,提出最大似然估计方法及其简化方法^[46-48]。基于子空间思想,提出了适用于局部扩展源的伪子空间加权算法^[49]和单次快拍的局部扩展源参数估计算法^[50]。但是,这些方法都是针对单个信号源的,对多个扩展源的情况,一些学者也提出一些方法,如基于 ESPRIT 的方法^[51]和基于协方差匹配的方法^[52]。但是,扩展信号源的波达方向估计问题仍处于初步研究阶段,需进一步深入研究。

1.2.3 阵列多参数估计

在阵列信号多维参数估计中,通常研究的多维参数估计包括二维 DOA 估计、DOA 与频率联合估计、DOA 与时延联合估计、DOA 与极化联合估计等。国内外许多学者做了大量的工作,取得了可喜的成绩,在国内外产生了较大的影响。

1. 二维 DOA 估计

二维 DOA 估计一般采用 L 型阵列、交叉十字阵列和面阵等实现二维参数的估计。二维 DOA 估计方法包括最大似然法^[101]、二维 MUSIC^[102,103]、二维 ESPRIT^[104]、传播算子方法^[105,106]、高阶累积量方法^[107]和 DOA 矩阵法^[22]等。

M.P. Clark 和 L. Scharf 于 1991 年提出了二维最大似然法^[101], 依据最大似然准则对阵列的输出数据进行时空二维处理获取二维参数的估计。M.Wax^[102]提出了二维 MUSIC 算法; Hua 等也给出了基于 L 型阵列的二维 MUSIC 算法^[103]。二维 MUSIC 算法是二维 DOA 估计的典型算法, 该方法可以产生渐进无偏估计, 但要在二维参数空间搜索谱峰, 计算量相当大, 限制了其在实际中的应用。Zoltowski^[104]提出的二维 Unitary ESPRIT 和二维 Beamspace ESPRIT 方法将复矩阵运算转化为实矩阵运算, 简化了运算复杂度。文献[105]将传播算子方法和 ESPRIT 算法相结合, 给出了一种快速的空间二维参数估计方法, 该算法无需任何搜索, 直接给出闭式解。文献[106]提出基于传播算子的低复杂度的二维角度估计算法, 该算法无需特征值分解, 具有线性复杂度。文献[107]中提出了一种利用高阶累积量来实现方位角和仰角的估计, 该方法适用于一般的阵列几何结构, 复杂度高。殷勤业^[108]提出了一种 DOA 矩阵法, 该方法通过对 DOA 矩阵的特征分解, 直接得到信号源的方位角与仰角, 无需任何谱峰搜索, 运算量低, 参数自动配对。但 DOA 矩阵法的缺点是需要通过双平行线阵等特殊的、规则的阵列才能实现二维 DOA 估计, 并存在“角度兼并”问题。在 DOA 矩阵法的基础上, 金梁提出了时空 DOA 矩阵法^[25, 26], 该方法在保持原 DOA 矩阵方法优点的前提下, 不需要双平行线阵, 克服了“角度兼并”等问题。

2. DOA 与频率联合估计

角度与频率联合估计方法包括线性预测方法^[111]、多维 MUSIC 方法^[112]、最大似然方法和 ESPRIT^[113, 114]方法等。这些方法中, 线性预测方法的估计性能略差, 最大似然方法和多维 MUSIC 方法则具有较好的估计性能, 然而最大似然方法需要进行多维非线性最优化搜索, 多维 MUSIC 方法也需进行多维的穷尽搜索, 二者计算量都很大。ESPRIT 算法由于无需谱峰搜索, 且参数估计性能也相当优越, 其应用研究更为丰富。Zoltowski^[113]在雷达信号处理领域讨论了二维波达方向与频率的联合估计问题。Elaardt 等在文献[114]中讨论了移动通信领域中二维波达方向与频率的联合估计, 以用于解决空分多址技术 (SDMA) 面临的问题。Elaardt 的算法是基于 Unitary-ESPRIT 方法的设计, 通过 Cayley 变换将复数矩阵转换为实矩阵进行处理以减小算法计算量, 但同时会导致参数估计精度下降。为了提高 DOA 与频率参数估计精度与稳健性, Strobach 在文献[115]中给出了基于总体最小平方与相位平均的 3D-ESPRIT 算法。Lemma^[116]提出基于多维 ESPRIT 算法的方位角—频率联合估计算法。在国内研究方面, 葛利嘉^[117]等针对窄带信号, 利用旋转不变技术实现了方位角—频率的联合估计。廖桂生等在文献[118]中利用频率作为旋转因子, 在阵列流形未知的条件下进行方位角—频率的盲估计。另外, 波达方向矩阵法^[22]也被应用于入射信号波达方向与频率的联合估计中。

3. DOA 与时延联合估计

DOA 与时延的联合估计方法包括最大似然方法^[120]、多维 MUSIC^[121, 122]和 ESPRIT 算法^[123]等。Wax 和 Leshem 在文献[120]中利用迭代方法进行最大似然最优化搜索, 从而同时获取多个入射信号的波达方向、时延与信号强度的联合估计。Ogawa 等在文献[121]中提出了一种加窗的二维 MUSIC 方法, 实现了对室内环境多径信号的分析。而在文献[122]中, Wang 等将时域滤波、空域滤波与时域 MUSIC 方法和空域 MUSIC 方法相结合, 提出了一种方位角—时延联合估计的 TST-MUSIC 方法。在移动通信多径信号波达方向与相对时延联合估计的问题上, 文献[123]给出了一类有效的联合角度与延迟估计方法, 此类算法均基于已知脉冲波形函数的傅里叶变换与解卷积操作, 通过将信号时延映射至频率域, 应用 ESPRIT 算法完成对方位角与时延的联合估计。

4. DOA 与极化联合估计

角度和极化联合估计目前常使用的方法主要有子空间方法和高阶累积量。用于 DOA 与极化联合估计的子空间方法主要是 ESPRIT 和 MUSIC。Jian Li 将 ESPRIT 方法推广到极化一角度域, 解决不同情形下极化敏感阵列的多参数估计问题^[124-127]。文献[127]研究由同心正交的 3 个电偶极子和 3 个电流环构成电磁矢量传感器, 在 ESPRIT 算法中利用了电偶极子和电流环输出之间的相对不变性。与此同时, K.T. Wong^[128]针对电磁矢量传感器阵列, 提出将单个电磁矢量传感器看作一个无角度模糊子阵, 利用空域 ESPRIT 实现稀疏矢量传感器阵列窄带信号源二维角度和极化参数估计。文献[129]利用 MUSIC 算法来估计信号到达角和极化状态角, 并提出空间一极化波束空间的概念。文献[130]利用类 ESPRIT 算法研究了矢量传感器任意分布且空间位置未知情形下信号空间到达角和极化状态角的估计问题, 并提出了闭式解, 但其性能较差。

在文献[131]中, Gonen 和 Mendel 基于四阶累积量提出了一种用最小约束实现到达角和极化参数的联合估计算法, 该算法仅要求阵列中有 3 个短偶极子阵元放置在固定位置, 阵列的其他阵元可具有任意未知的响应和几何结构, 但只考虑了一维到达角的情况。徐友根等探讨了基于四阶累积量的二维到达角和极化的联合估计问题^[132], 还研究相干信号源 DOA 和极化参数的联合估计^[133]。

5. 其他多维参数估计

频率、DOA 和极化联合估计研究。文献[109,119,134]研究了基于 ESPRIT 的频率、二维到达角和极化参数的联合估计; 文献[108,110]则研究了基于四阶累积量的频率、二维到达角和极化的联合估计算法。

文献[53]研究了 DOA、频率与时延的联合估计, 通过空间域累积构造的信号协方差矩阵, 使得提出的扩展 ESPRIT 算法可以在单次回波内通过特征值与特征向量同时获得对目标波达方向、频率与时延的联合估计等。

1.3 本书的内容

第 1 章分析了阵列信号处理的性能优势和应用前景, 并综述了其发展史及现状。

第 2 章介绍了阵列信号的基础知识, 是后续章节阵列信号处理问题研究的基础。

第 3 章为波束形成算法, 介绍了多种波束形成算法, 包括 LCMV 的波束形成算法、广义旁瓣相消 (GSC) 的波束形成算法、基于投影分析的波束形成算法、过载情况下的自适应波束形成算法、基于高阶累积量的波束形成算法、基于周期平稳性的波束形成算法、基于恒模特性的盲波束形成算法、自适应对角线加载的波束形成算法和鲁棒波束形成算法等。

第 4 章主要研究了波达方向估计问题, 介绍了经典的 MUSIC 算法及其修正算法、Capon 算法、最大似然算法、传播算子、BEWE 算法、ESPRIT 算法及其改进型算法、子空间拟合算法和基于四阶累积量的 DOA 估计算法等。

第 5 章研究相干信号的 DOA 估计算法, 重点介绍了空间平滑算法、改进的 MUSIC 算法、基于 Toeplitz 矩阵重构的相干信号 DOA 算法及其改进算法、SUMWE 算法和任意阵列下的相干信号 DOA 估计算法。