



# 阵列信号处理的 理论和应用

ZHENLIE XINHAO  
CHULI DE  
LILUN HE YINGYONG

张小飞 汪飞 徐大专 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 阵列信号处理的理论和应用

张小飞 汪飞 徐大专 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

阵列信号处理的理论和应用 / 张小飞,汪飞,徐大  
专编著. —北京:国防工业出版社,2010. 11

ISBN 978-7-118-07100-9

I. ①阵. . . II. ①张 . ②汪. . . ③徐 . . III. ①信号  
处理 IV. ①TN911. 7<sup>\*</sup>

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 204741 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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 16 字数 359 千字

2010 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 35.00 元(含光盘)

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 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的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研究成果。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领域。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、高信号增益、极强的干扰抑制能力以及高空间分辨能力等优点。

本书主要研究波束形成、波达方向估计算法、阵列多参数估计及其应用。本书主要特色如下。

(1) 结构完整。虽然近年来国内外已经出版了几本涉及空间谱估计内容的优秀著作,但本书的体系更为完整,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) 内容选材广。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。书中不仅对阵列信号处理中一些传统方法进行了详细讲解,同时对一些新方法(如四元数、PARAFAC 方法)也进行了研究(详见附录 B)。

(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,尽量做到深入浅出,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,书末和随书附赠光盘中附有必要的数学知识和阵列信号处理 MATLAB 程序。

本书自动笔至 2010 年完成,历时 5 年。特别感谢解放军理工大学蔡跃明教授和东南大学吴乐南教授推荐出版。本书在编写过程中,参考了大量的著作和论文,在此对其著译者表示感谢。本书得到了国家自然科学基金(60801052)、航空自然科学基金(2008ZC52026,2009ZC52036)、高等学校博士学科点新教师基金(200802871056)、南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(NS2010114)和南京航空航天大学优秀青年教师教育教学改革研究项目资助。

本书由张小飞教授、汪飞博士和徐大专教授执笔。汪飞博士编写了第2章、第9章和附录,其他内容由张小飞教授和徐大专教授完成。本书在编写过程中,还得到了冯宝、王大元、余俊、是莺、李建峰、冯高鹏和孙中伟等研究生的帮助。由于阵列信号处理仍处于迅速发展过程中,书中不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者  
2010年9月

# 目 录

符号说明 .....	1
第 1 章 绪论 .....	2
1.1 研究背景 .....	2
1.2 阵列信号处理的发展史及现状 .....	2
1.2.1 波束形成技术 .....	2
1.2.2 空间谱估计方法 .....	5
1.2.3 阵列多参数估计 .....	6
1.3 本书的安排 .....	8
参考文献 .....	9
第 2 章 阵列信号处理基础 .....	15
2.1 矩阵代数的相关知识 .....	15
2.1.1 特征值与特征向量 .....	15
2.1.2 广义特征值与广义特征向量 .....	15
2.1.3 矩阵的奇异值分解 .....	15
2.1.4 Toeplitz 矩阵 .....	16
2.1.5 Hankel 矩阵 .....	16
2.1.6 Vandermonde 矩阵 .....	16
2.1.7 Hermitian 矩阵 .....	17
2.1.8 Kronecker 积 .....	17
2.1.9 Khatri-Rao 积 .....	17
2.2 信号模型 .....	18
2.2.1 窄带信号 .....	18
2.2.2 相关系数 .....	18
2.2.3 噪声模型 .....	18
2.3 阵列天线的统计模型 .....	18
2.3.1 前提及假设 .....	18
2.3.2 阵列的基本概念 .....	19
2.3.3 天线阵模型 .....	20
2.3.4 阵列的方向图 .....	21
2.3.5 波束宽度 .....	22

2.3.6	分辨力 .....	23
2.4	阵列响应矢量/矩阵 .....	23
2.5	阵列协方差矩阵的特征分解 .....	26
2.6	信源数估计算法 .....	28
2.6.1	特征值分解方法 .....	29
2.6.2	信息论方法 .....	29
2.6.3	平滑秩序列法 .....	30
2.6.4	盖氏圆方法 .....	31
2.6.5	正则相关技术 .....	33
	参考文献 .....	34
<b>第3章</b>	<b>波束形成算法 .....</b>	<b>36</b>
3.1	波束形成定义 .....	36
3.2	常用的波束形成算法 .....	36
3.2.1	波束形成原理 .....	36
3.2.2	波束形成的最佳权矢量 .....	38
3.2.3	波束形成的准则 .....	40
3.2.4	仿真与分析 .....	41
3.3	自适应波束形成算法 .....	42
3.3.1	引言 .....	42
3.3.2	自适应波束形成的最佳权矢量 .....	42
3.3.3	权矢量更新的自适应算法 .....	44
3.4	广义旁瓣相消器(GSC)的波束形成算法及其改进 .....	45
3.4.1	广义旁瓣相消器算法 .....	45
3.4.2	GSC的改进算法 .....	46
3.4.3	仿真及分析 .....	47
3.5	基于投影分析的波束形成 .....	48
3.5.1	基于投影的波束形成 .....	48
3.5.2	基于斜投影的波束形成算法 .....	49
3.6	过载情况下的自适应波束形成算法 .....	51
3.6.1	信号模型 .....	52
3.6.2	近似最小方差法波束形成器 .....	52
3.6.3	阵列固有的协方差矩阵的求解 .....	53
3.7	基于高阶累积量的波束形成算法 .....	53
3.7.1	阵列模型 .....	54
3.7.2	利用高阶累积量方法估计期望信号的方向矢量 .....	54
3.7.3	基于高阶累积量的盲波束形成 .....	55
3.8	基于周期平稳性的波束形成算法 .....	55
3.8.1	阵列模型与信号周期平稳性 .....	55

3.8.2	CAB 类盲波束形成算法 .....	56
3.9	基于恒模的盲波束形成算法 .....	58
3.9.1	信号模型 .....	58
3.9.2	随机梯度恒模算法 .....	58
3.9.3	最小二乘恒模算法 (LS-CMA) .....	59
3.10	自适应对角线加载的波束形成算法 .....	60
3.10.1	引言 .....	60
3.10.2	问题的提出 .....	61
3.10.3	自适应对角线加载波束形成算法 .....	62
3.10.4	仿真及分析 .....	63
3.11	变换域波束形成技术 .....	65
3.11.1	引言 .....	65
3.11.2	基于频域的自适应波束形成算法 .....	65
3.11.3	小波域自适应波束形成算法 .....	68
3.12	鲁棒的自适应波束成形 .....	70
3.12.1	对角加载方法 .....	71
3.12.2	基于特征空间的方法 .....	71
3.12.3	贝叶斯方法 .....	72
3.12.4	基于最坏情况性能优化的方法 .....	73
3.12.5	基于概率约束的方法 .....	73
	参考文献 .....	74
<b>第 4 章</b>	<b>DOA 估计算法 .....</b>	<b>77</b>
4.1	DOA 估计的发展 .....	77
4.2	传统的 DOA 估计方法 .....	77
4.2.1	Capon 算法 .....	77
4.2.2	前向预测算法 .....	78
4.2.3	最大熵算法 .....	79
4.2.4	最小模算法 .....	79
4.3	MUSIC 算法及其修正算法 .....	80
4.3.1	MUSIC 算法 .....	81
4.3.2	MUSIC 算法的推广形式 .....	81
4.3.3	MUSIC 算法性能分析 .....	83
4.3.4	求根 MUSIC 算法 .....	86
4.3.5	求根 MUSIC 算法性能 .....	86
4.4	最大似然法 .....	87
4.4.1	确定性最大似然法 .....	87
4.4.2	随机性最大似然法 .....	89
4.5	子空间拟合算法 .....	90



4.5.1	信号子空间拟合(SSF)	90
4.5.2	噪声子空间拟合(NSF)	91
4.5.3	子空间拟合算法性能	91
4.5.4	子空间拟合算法的实现	93
4.6	基于特征空间的 DOA 估计算法	98
4.6.1	信号模型	99
4.6.2	基于特征空间的 DOA 估计算法	100
4.6.3	仿真和分析	101
4.7	ESPRIT 算法及其修正算法	102
4.7.1	ESPRIT 算法的基本模型	102
4.7.2	LS-ESPRIT	104
4.7.3	TLS-ESPRIT	105
4.7.4	SLS-ESPRIT	106
4.7.5	酉 ESPRIT	108
4.7.6	ESPRIT 算法理论性能	111
4.8	基于四阶累积量的 DOA 估计	113
4.8.1	引言	113
4.8.2	四阶累积量与二阶统计量之间的关系	113
4.8.3	四阶累积量的阵列扩展特性	115
4.8.4	MUSIC-Like 算法	116
4.8.5	Virtual-ESPRIT 算法	116
4.9	传播算子 DOA 估计算法	118
	参考文献	119
<b>第 5 章</b>	<b>相干信源 DOA 估计</b>	<b>122</b>
5.1	相干信源 DOA 估计的发展	122
5.2	空间平滑算法	123
5.3	改进的 MUSIC 算法(IMUSIC)	124
5.4	基于 Toeplitz 矩阵重构的 ESPRIT-Like 算法	125
5.5	任意阵列下的相干信号 DOA 估计	126
	参考文献	128
<b>第 6 章</b>	<b>二维 DOA 估计</b>	<b>130</b>
6.1	引言	130
6.2	L 型阵列下盲二维波达方向估计	131
6.2.1	数据模型	131
6.2.2	基于移不变性的改进的二维波达方向估计	132
6.3	面阵中二维 DOA 估计算法	134
6.3.1	接收信号模型	135

6.3.2	二维 MUSIC 算法	135
6.3.3	二维 Capon 算法	136
6.3.4	二维求根 MUSIC 算法	136
6.3.5	二维 ESPRIT 及二维 Unitary-ESPRIT 算法	138
6.3.6	二维传播算子算法	143
6.3.7	PARAFAC 技术	145
6.3.8	小结	147
6.4	基于增广矩阵束的 L 型阵列的二维 DOA 估计	148
6.4.1	阵列结构与信号模型	148
6.4.2	基于 MEMF 的二维 DOA 估计算法	148
6.5	基于平行 L 型阵列的联合对角化 DOA 矩阵法	151
6.5.1	阵列结构及信号模型	151
6.5.2	构造两个 DOA 矩阵	152
6.5.3	联合对角化技术	153
	参考文献	155
<b>第 7 章</b>	<b>宽带阵列信号处理</b>	<b>157</b>
7.1	引言	157
7.2	宽带阵列信号处理基础	158
7.2.1	宽带信号的概念	158
7.2.2	阵列信号模型	158
7.3	宽带信号源的 DOA 估计	159
7.3.1	非相干信号子空间 (ISM) 方法	159
7.3.2	相干信号子空间 (CSM) 方法	160
7.3.3	聚焦矩阵的构造方法	161
	参考文献	164
<b>第 8 章</b>	<b>阵列多参数估计</b>	<b>165</b>
8.1	引言	165
8.2	联合角度频率估计的 ESPRIT 算法	166
8.2.1	数据模型	166
8.2.2	波达方向 - 频率的联合估计	167
8.2.3	推广	168
8.3	基于 PARAFAC 的盲角度和频率估计算法	170
8.3.1	数据模型	170
8.3.2	三线性分解和可辨识性	171
8.3.3	联合角度和频率估计	172
8.4	基于传播算子的波达方向、频率联合估计算法	174
8.4.1	数据模型	174

8.4.2 基于传播算子的波达方向、频率联合估计方法	174
8.5 联合角度和时延估计的 ESPRIT 方法	176
8.5.1 数据模型	176
8.5.2 联合角度-时延估计问题	177
8.5.3 联合角度-时延估计的 ESPRIT 算法	179
参考文献	182
<b>第9章 四元数理论在阵列信号处理中的应用</b>	<b>184</b>
9.1 概述	184
9.2 四元数在二维 DOA 估计中的应用	184
9.3 四元数在联合角度频率估计中的应用	187
9.4 四元数在色噪声矢量阵列信号处理中的应用	188
参考文献	191
<b>第10章 MIMO 雷达的角度估计</b>	<b>193</b>
10.1 MIMO 雷达接收信号模型	194
10.2 2D-MUSIC 算法	194
10.3 MUSIC 算法	195
10.4 求根 MUSIC 算法	197
10.5 基于 ESPRIT 算法的 MIMO 雷达的角度估计	197
10.6 基于三线性分解算法的 MIMO 雷达的角度估计	199
10.7 基于降维 Capon 的 MIMO 雷达的角度估计	201
10.8 本章小结	203
参考文献	203
<b>第11章 声矢量传感器阵列的 DOA 估计</b>	<b>205</b>
11.1 引言	205
11.2 基于多不变 MUSIC 算法的声矢量传感器阵的 DOA 估计	205
11.3 基于 ESPRIT 算法的任意声矢量传感器阵列的二维波达方向估计	208
11.4 基于三线性分解的任意声矢量传感器阵列的二维波达方向估计	211
参考文献	213
<b>第12章 极化敏感阵列信号处理</b>	<b>215</b>
12.1 引言	215
12.1.1 研究背景	215
12.1.2 极化敏感阵列的国内外研究现状分析	215
12.2 极化敏感阵中 PARAFAC 信号检测法	217
12.2.1 信号接收模型	217
12.2.2 PARAFAC 接收算法	218

12.3 极化敏感阵的盲 DOA 和极化估计算法 .....	220
12.3.1 DOA 估计 .....	220
12.3.2 极化估计 .....	221
参考文献 .....	221
<b>附录</b> .....	<b>224</b>
附录 A 本书部分信号处理新方法的数学基础 .....	224
附录 B 本书阵列信号处理算法汇总 .....	240
附录 C MATLAB 程序(见附赠光盘) .....	240
<b>缩略词</b> .....	<b>241</b>

## 符号说明

$(.)^T$	表示转置
$(.)^H$	表示共轭转置
$(.)^*$	表示复共轭
$(.)^+$	表示广义逆
$(.)^{-1}$	表示逆
$\  \cdot \ _F$	Frobenius 范数
$\text{angle}(\cdot)$	取相位
$A \otimes B$	为 Kronecker 积
$A \circ B$	为 Khatri-Rao 积
$\text{Re}\{\cdot\}$	取实部
$\text{Im}\{\cdot\}$	取虚部
$E[\cdot]$	求数学期望
$\text{tr}\{\cdot\}$	矩阵的迹
$\det\{\cdot\}$	矩阵的行列式
$\text{diag}\{x\}$	一个对角矩阵, 对角线元素为向量 $x$ 的元素
$D_m(\cdot)$	由矩阵的 $m$ 行构造的一个对角矩阵。
$\lceil \tau \rceil$	向上取整, 表示不大于 $\tau$ 的最大整数

# 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,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<sup>[1-4]</sup>。阵列信号处理将一组传感器按一定方式布置在空间不同位置上,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以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、高信号增益、极强的干扰抑制能力以及高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有以下 5 个方面。

(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也可分离。

## 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,使用锁相环进行天线跟踪。阵列信号处理的重要开端是 Howells 于 1965 年提出了自适应陷波的旁瓣对消器<sup>[5]</sup>。1976 年,Applebaum<sup>[6]</sup>提出了使信干噪比(SINR)最大化的反馈控制算法。另一个显著的进展是 Widrow<sup>[7]</sup>于 1967 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<sup>[8]</sup>;Schmidt 于 1979 年提出的多重信号分类(MUSIC)方法<sup>[9]</sup>;Roy 等人于 1986 年发展的估计信号参数的旋转不变技术(ESPRIT)<sup>[10]</sup>;Gabriel<sup>[11]</sup>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<sup>[12]</sup>,1990 年开始在民用蜂窝式通信中使用天线阵列<sup>[13]</sup>。

### 1.2.1 波束形成技术

波束形成(BF)亦称空域滤波,是阵列处理的一个主要方面,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,自适应天线至今已经历了 50 多年的发展,自适应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,许多好的算法已经被总结出来。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,包括:最小均方误差(MSE)准则;最大信号干扰噪声比(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,这四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,早期主要注重于闭环算法的研究,主要的闭环算法有最小均方(LMS)算法、差分最陡下降算法、加速梯度算法以及它们的变型算法。

广义旁瓣相消器(GSC)是 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包含于协方差矩阵引起的信号对消问题。但是正如参考文献[67]中所指出,由于阵列天线误差的存在,GSC 的阻塞矩阵并不能很好地期望信号阻塞掉,而会使其一部分能量泄漏到辅助支路中,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。参考文献[67]将泄漏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,但人工注入的噪声必须具有合适的功率。参考文献[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。参考文献[76]提出了信号子空间投影的 GSC 改进算法,来提高 GSC 稳健性,但在低信噪比下波束形成发生畸变。本书将提出一种改进的广义旁瓣相消的波束形成方法,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,而且克服了参考文献[76]中提出的改进 GSC 算法在低信噪比下性能差的缺点。

对角线加载方法。我们常用的 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,输出信号干扰噪声比下降。参考文献[74]提出了对角线加载的波束形成方法来抑制方向图畸变。参考文献[73-74]提出了对角线加载的波束形成方法来抑制方向图畸变,分析了加载量对自适应阵列干扰噪声比的影响。对角线加载技术能减弱小特征值对应的噪声波束的影响,改善方向图畸变,但是加载量的确定一直以来是一个比较困难的问题。参考文献[80]提出了一种自适应的对角线加载的波束形成方法。

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波束形成算法(ESB)<sup>[61-64]</sup>,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,该算法具有较快的收敛速度和较强的稳健性。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。参考文献[65]提出了一种改进的 ESB 自适应波束形成算法,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<sup>[64]</sup>,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,参考文献[69]提出了一种基于广义特征空间的波束形成器。参考文献[70]提出了正交投影方法(OP)。参考文献[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。参考文献[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形知识得到的。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。参考文献[57-58]提出的基于特征空间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。参考文献[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,从而大大提高波束形成的稳健性。参考文献[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扩展,参考文献[81]研究基于斜投影的波束形成算法,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。

变换域的自适应滤波方法。最小均方(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<sup>[86]</sup>。为了提高收敛速度和提高性能,将研究变换域的自适应滤波方法。参考文献[87-89]研究了频域的波束形成技术;参考文献[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<sup>[92]</sup>,并提出了小波域和小波包变换的自适应波束形成算法<sup>[83,93,95]</sup>。

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<sup>[3,14-16]</sup>。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媒介的变化。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<sup>[14]</sup>、基于测向技术的波束形成<sup>[15]</sup>和基于贝叶斯方法的鲁棒自适应波束形成<sup>[16]</sup>等,这些方法在一定程度都能够提高算法的鲁棒性。

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,其共同特点在于不需要阵列校验、波达方向、训练序列、干扰和噪声的空间自相关矩阵等先验知识。目前,盲波束形成主要有三类:基于恒模的算法、基于高阶累积量的方法以及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。基于高阶累积量的方法由于利用信号的高阶统计特性,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<sup>[29]</sup>。

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,究其原因原因是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。参考文献[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)估计的问题,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的信号的空间位置(即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(及其改进算法<sup>[96-100]</sup>)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:若传感器个数比信源个数多,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,子空间方法实现了波达方向估计分辨率的突破。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<sup>[17-21]</sup>。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。殷勤业等人提出了波达方向矩阵法<sup>[22]</sup>。此方法根据阵列输出的协方差矩阵的性质,构造了波达方向矩阵,然后对波达方向矩阵进行特性分解,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。此方法由于计算量小、参数能够自动匹配等特点而引起人们的重视。例如参考文献[23,24]利用波达方向矩阵法,实现信号频率和波达方向的同时估计。但是,波达方向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,金梁等人提出了时空波达方向矩阵法<sup>[25,26]</sup>。该方法在保持原波达方向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,而且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