

“十三五”国家重点图书出版规划项目

通信高精度定位理论与技术丛书

传感器阵列 信源定位

张小飞 李建峰 徐大专◎著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

“十三五”国家重点图书出版规划项目

通信高精度定位理论与技术丛书

传感器阵列 信源定位

张小飞 李建峰 徐大专◎著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

传感器阵列信源定位是定位领域的一个重要分支,它采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,传感器阵列信源定位具有高信号增益、极强的干扰抑制能力,以及更高的空间分辨能力等优点,具有重要的军事、民事应用价值和前景。具体来说,传感器阵列信源定位已在雷达、声呐、通信、地震勘探、射电天文,以及医学诊断等多种国民经济、科学研究和国防军事领域得到应用。本书分为 8 章,主要内容包括传感器阵列基础、一维空间谱估计、二维空间谱估计、传感器阵列中非圆信号的空间谱估计、传感器阵列 DOA 跟踪、传感器阵列分布式信源定位、传感器阵列近场信源定位。

本书的读者对象为通信与信息系统、信号和信息处理、微波和电磁场、水声等专业的高年级本科生和研究生,以及相关领域的研究人员。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

传感器阵列信源定位/张小飞,李建峰,徐大专著. —北京:电子工业出版社,2018.12
(通信高精度定位理论与技术丛书)

ISBN 978-7-121-35540-0

I. ①传… II. ①张… ②李… ③徐… III. ①无源定位—研究 IV. ①TN971

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 264953 号

策划编辑:张楠

责任编辑:张楠

文字编辑:钱维扬

印刷:天津画中画印刷有限公司

装订:天津画中画印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开本:720×1 000 1/16 印张:21.75 字数:482 千字

版次:2018 年 12 月第 1 版

印次:2018 年 12 月第 1 次印刷

定价:98.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010) 88254579。

丛书编委会

丛书主编：廖桂生

丛书副主编：吴启晖 张钦宇

丛书编委（按姓氏笔画排序）：

沈 渊 张小飞 万 群 刘聪锋

郭福成 王 鼎 王建辉 尹洁昕

丛书序

无线信号定位技术已广泛应用于通信、雷达、目标监测、导航遥测、地震勘测、射电天文、紧急救助、安全管理等领域，其在工业生产和国防事业中都发挥着重要作用。鉴于该领域涉及的理论与技术十分丰富，知识覆盖面广，且新理论与新方法不断涌现，因此需要一套精品丛书来系统阐述其中的知识体系，以便适应该领域的发展需求。在此背景下，本丛书编委会发起《通信高精度定位理论与技术丛书》编写计划，并集聚国内该领域的优秀作者，力求真实、科学、系统地反映无线定位技术的知识体系、先进理论方法和工程应用等，从而打造出一套精品专著系列丛书。

本丛书定位为系列专著，其内容兼具系统性、基础性和前沿性，其中很多内容是作者多年研究成果的提炼与升华。本丛书的读者群包括从事通信与信息系统、信号与信息处理、雷达信号处理、控制科学与工程、应用数学等专业领域的研究人员、学者及工程技术人员。

我相信本丛书的出版必然会积极促进该领域的进一步发展，并在实际工程应用中发挥重要作用。

廖桂生

2018年11月

前言

众所周知,信号处理的基本原则是尽可能地利用、提取和恢复包含在信号特征中的有用信息。随着信息理论和技术的日益发展,能否在复杂的电磁环境中对信号参数进行有效检测和精确估计就显得尤为重要。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领域中,通过传感器阵列或天线阵列把时域采样变成时空采样,将时间频率扩展到空间频率(角度),从而将时域信号处理的许多理论成果推广到空域,开辟了传感器阵列信号处理这一新的研究领域。近年来,传感器阵列信号处理逐渐成为信号处理领域的一个重要分支。与采用传统的单个定向传感器相比,用传感器阵列接收空间信号具有灵活的波束控制、较高的信号增益、极强的干扰抑制能力及更高的空间分辨能力等优点,因此传感器阵列信号处理技术具有重要的军事、民事应用价值和广阔的应用前景。具体来说,传感器阵列信号处理技术已在雷达、声呐、通信、地震勘探、射电天文及医学诊断等多种国民经济、科学研究和军事应用领域得到应用。

本书是关于传感器阵列信源定位的著作,以信源定位为研究对象,主要研究波达方向估计算法、二维空间谱估计、角度跟踪、非圆信号信源定位、分布式信源定位及近场信源定位等问题。

本书力图实现 3 个特色:

① 结构完整。近年来,国内外虽然已经出版了多本涉及空间谱估计内容的优秀著作,但各有侧重。本书不仅包括空间谱估计,还覆盖非圆信号信源定位、分布式信源定位和近场信源定位等前沿技术。

② 内容选材广。传感器阵列信源定位理论丰富、应用广泛,为了写好此书,著者收集了大量国内外文献资料,并做了精心组织,以期尽可能反映出这一学科中的精华内容。本书对传感器阵列信源定位的传统方法做了详细介绍,同时对一些新方法,如平行因子方法、压缩感知等进行了研究。文中详细列出

40 多种信源定位算法。

③ 可读性强。对于许多读者来说,传感器阵列信源定位所涉及的内容难学、难懂、难理解,尤其是专业论文不易读懂。本书注意到了这一问题,尽量在表述时做到由浅入深,特别注重表达的清晰性、易懂性和可读性。需要说明的是,为了方便读者查找,各章涉及的算法、定理、推论等均按照其所在节编号,并未全章统一编号。比如,算法 3.2 对应的节为 3.2 节。

本书被江苏省列为“十三五”重点教材项目(J081006)。著者从 2017 年开始动笔,至 2018 年完成,写作历时 2 年。本书在编写过程中,参考了大量的著作和论文,得到国家自然科学基金(61371169, 61301108, 61071164)和南京航空航天大学研究生院精品教材项目的支持,在此一并表示感谢。

本书由南京航空航天大学的张小飞教授、李建峰博士、徐大专教授编写。本书在编写过程中还得到了时娜、程骞琳、夏忠喜、杨东林、郑旺、张立岑、李书等硕士研究生和博士研究生的帮助。由于时间仓促,笔者水平有限,加上这一领域仍然处于迅速发展之中,书中不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

张小飞

2018 年 8 月

注 释 表

符号和表达式	含 义	符号和表达式	含 义
$\otimes$	Kronecker 积	$\text{Im}\{\}$	取虚部
$\oplus$	Hadamard 积	$\text{tr}\{\}$	取矩阵迹
$\odot$	Khatri-Rao 积	$E\{\}$	求期望
$(\cdot)^*$	共轭	$\text{rank}\{\}$	求矩阵的秩
$(\cdot)^T$	转置	$\det\{\}$	取行列式值
$(\cdot)^H$	共轭转置	$\text{angle}\{\}$	取相位角
$(\cdot)^+$	广义逆	$\text{vec}\{\}$	矩阵矢量化
$(\cdot)^{-1}$	矩阵求逆	$\exp\{a\}$	e^a
$(\cdot)^{1/2}$	矩阵的均方根	$\text{sinc}(a)$	$\sin(\pi a)/\pi a$
$(\cdot)^{-1/2}$	矩阵均方根的逆	$\text{blkdiag}\{\}$	构造块对角矩阵
$(\cdot)^{-T/2}$	矩阵均方根的逆的转置	$\text{Rect}[a,b]$	定义在区间 $[a,b]$ 上的单位窗函数
$j = \sqrt{-1}$	虚数单位	$\mathbb{R}$	实数集
$ $	取绝对值	$\mathbb{C}$	复数集
$\lceil \cdot \rceil$	向上取整	$\hat{E}$	E 的估计值
$\lfloor \cdot \rfloor$	向下取整	$D_n(A)$	取 A 的第 n 行构造对角矩阵
$\langle \cdot \rangle$	取最接近的整数	$\ \cdot\ _F$	Frobenius 范数
$[a]_m$	矢量 a 的第 m 个元素	$\ \cdot\ _p$	矢量 p 范数
$[A]_{m,n}$	矩阵 A 的第 (m,n) 个元素	$\partial(a)/\partial(b)$	a 关于 b 的导数
$[A](:,m)$	矩阵 A 的第 m 列	$\mathcal{L}\{\}$	求行列式的最大阶数
$\text{diag}\{\}$	构造对角矩阵	I_L	$L \times L$ 维单位矩阵
$\text{Re}\{\}$	取实部	$O(a)$	计算复杂度 (与 a 线性相关, a 为正实数)

缩 略 词

缩 略 词	英 文 全 称	中 文 全 称
AP	Alternating Projection	交替投影
CRB	Cramér-Rao Bound	克拉美-罗界
CS	Compressed Sensing	压缩感知
DOA	Direction Of Arrival	到达角
DOF	Degree of Freedom	自由度
DFT	Discrete Fourier Transform	离散傅里叶变换
DSPE	Distributed Signal Parameter Estimator	分布信号参数估计算法
ESPRIT	Estimating Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques	基于旋转不变性的信号估计算法
FFT	Fast Fourier Transform	快速傅里叶变换
FIM	Fisher Information Matrix	费舍尔信息矩阵
GAM	Generalized Array Manifold	广义阵列流型
IQML	Iterative Quadratic Maximum Likelihood	迭代二次型极大似然
GESPRIT	Generalized ESPRIT	广义 ESPRIT
LP	Linear Prediction	线性预测
LS	Least Square	最小二乘
MIMO	Multiple Input Multiple Output	多输入多输出
ML	Maximum Likelihood	最大似然
MSE	Mean Squared Error	均方误差
MUSIC	MUltiple SIgnal Classification	多重信号分类算法
NC	NonCircular	非圆
NSF	Noise Subspace Fitting	噪声子空间拟合
PARAFAC	PARAllel FACtor	平行因子
PM	Propagator Method	传播算子
RD	Reduced Dimension	降维
RMSE	Root Mean Squared Error	均方根误差
SSF	Signal Subspace Fitting	信号子空间拟合
SOS	Second-Order Statistics	二阶统计量
SNR	Signal to Noise Ratio	信噪比
TALS	Trilinear Alternating Least Square	三线性交替最小二乘
TLS	Total Least Square	总体最小二乘
WSF	Weight Subspace Fitting	加权子空间拟合
ULA	Uniform Linear Array	均匀线阵
UCA	Uniform Circular Array	均匀圆阵

算法列表

序 号	算 法 名 称	对 应 章 节
1	算法 3.2: Capon 算法	3.2 节
2	算法 3.3a: 基本 MUSIC 算法	3.3 节
3	算法 3.3b: 求根 MUSIC 算法	3.3 节
4	算法 3.4: 确定性最大似然 (DML) 算法	3.4 节
5	算法 3.5a: AP 算法	3.5 节
6	算法 3.5b: IQML 算法	3.5 节
7	算法 3.5c: MODE 算法	3.5 节
8	算法 3.6a: LS-ESPRIT 算法	3.6 节
9	算法 3.6b: TLS-ESPRIT 算法	3.6 节
10	算法 3.7a: MUSIC-like 算法	3.7 节
11	算法 3.7b: virtual-ESPRIT 算法	3.7 节
12	算法 3.8a: 谱峰搜索传播算子	3.8 节
13	算法 3.8b: 旋转不变传播算子	3.8 节
14	算法 3.9: 谱搜索广义 ESPRIT 算法	3.9 节
15	算法 3.11a: 空间平滑 MUSIC 算法	3.11 节
16	算法 3.11b: IMUSIC 算法	3.11 节
17	算法 3.11c: 基于 Toeplitz 矩阵重构的 ESPRIT-like 算法	3.11 节
18	算法 3.11d: 阵列映射的相干信号 DOA 估计	3.11 节
19	算法 3.12: 基于 DFT 技术的大规模阵列 DOA 估计算法	3.12 节
20	算法 4.2a: 基于 ESPRIT 的二维 DOA 估计算法	4.2 节
21	算法 4.2b: 基于 PM 的二维 DOA 估计算法	4.2 节
22	算法 4.3a: RD-MUSIC 算法	4.3 节
23	算法 4.3b: 级联 MUSIC 算法	4.3 节
24	算法 4.4: 基于三线性模型的二维 DOA 估计算法	4.4 节
25	算法 4.5: 基于压缩感知三线性模型的二维 DOA 估计算法	4.5 节
26	算法 4.6: DOA 矩阵方法	4.6 节
27	算法 5.2: NC-ESPRIT 算法	5.2 节
28	算法 5.3: 降维 NC-Capon 算法	5.3 节
29	算法 5.4: 降维 NC-MUSIC 算法	5.4 节

(续表)

序 号	算 法 名 称	对 应 章 节
30	算法 5.5: 频谱搜索 NC-GESPRIT 算法	5.5 节
31	算法 6.2: PAST 算法	6.2 节
32	算法 6.3: PARAFAC-RLST 算法	6.3 节
33	算法 6.4: Kalman 滤波算法	6.4 节
34	算法 7.2: 基于 ESPRIT 的分布式信源定位算法	7.2 节
35	算法 7.4: 级联 DSPE 算法	7.4 节
36	算法 7.5: 基于广义 ESPRIT 的分布式信源定位算法	7.5 节
37	算法 7.6: 基于快速 PARAFAC 的分布式信源定位算法	7.6 节
38	算法 8.2: 基于二阶统计量的近场信源定位算法	8.2 节
39	算法 8.3: 基于 2D-MUSIC 的近场信源定位算法	8.3 节
40	算法 8.4: 基于降秩 MUSIC 的近场信源定位算法	8.4 节
41	算法 8.5: 基于降维 MUSIC 的近场信源定位算法	8.5 节

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 传感器阵列信源定位发展及现状	1
1.2.1 空间谱估计方法	2
1.2.2 阵列多维参数估计	4
1.3 本书的安排	7
参考文献	8
第 2 章 传感器阵列基础	13
2.1 矩阵代数的相关知识	13
2.1.1 特征值与特征向量	13
2.1.2 广义特征值与广义特征向量	13
2.1.3 矩阵的奇异值分解	13
2.1.4 Toeplitz 矩阵	14
2.1.5 Hankel 矩阵	14
2.1.6 Vandermonde 矩阵	15
2.1.7 Hermitian 矩阵	15
2.1.8 Kronecker 积	15
2.1.9 Khatri-Rao 积	16
2.1.10 Hadamard 积	17
2.1.11 向量化	17
2.2 信源和噪声模型	18
2.2.1 窄带信号	18
2.2.2 相关系数	18
2.2.3 噪声模型	19
2.3 阵列天线的统计模型	19

2.3.1	前提及假设	19
2.3.2	阵列的基本概念	19
2.3.3	天线阵列模型	21
2.3.4	阵列的方向图	22
2.3.5	波束宽度	23
2.3.6	分辨率	24
2.4	阵列响应矢量/矩阵	25
2.5	阵列协方差矩阵的特征值分解	29
2.6	信源数估计方法	31
2.6.1	特征值分解方法	32
2.6.2	信息论方法	32
2.6.3	其他信源数估计方法	33
	参考文献	34
第 3 章	一维空间谱估计	36
3.1	引言	36
3.2	Capon 算法和性能分析	37
3.2.1	数据模型	37
3.2.2	Capon 算法	37
3.2.3	改进的 Capon 算法	38
3.2.4	Capon 算法的均方误差分析	39
3.3	MUSIC 算法及其修正算法	42
3.3.1	MUSIC 算法	42
3.3.2	MUSIC 算法的推广形式	43
3.3.3	MUSIC 算法的性能分析	45
3.3.4	求根 MUSIC 算法	48
3.4	最大似然法	50
3.4.1	确定性最大似然法	51
3.4.2	随机性最大似然法	52
3.5	子空间拟合算法	53
3.5.1	信号子空间的拟合 (SSF)	54
3.5.2	噪声子空间的拟合 (NSF)	55
3.5.3	子空间拟合算法的性能分析	56
3.5.4	子空间拟合算法的实现	58
3.6	ESPRIT 算法及其修正算法	65

3.6.1	ESPRIT 算法	65
3.6.2	LS-ESPRIT 算法	68
3.6.3	TLS-ESPRIT 算法	69
3.6.4	ESPRIT 算法的理论性能	70
3.7	基于四阶累积量的 DOA 估计	73
3.7.1	四阶累积量与二阶统计量之间的关系	74
3.7.2	四阶累积量的阵列扩展特性	75
3.7.3	MUSIC-like 算法	77
3.7.4	virtual-ESPRIT 算法	77
3.8	传播算子	79
3.8.1	谱峰搜索传播算子	79
3.8.2	旋转不变传播算子	85
3.9	基于广义 ESPRIT 算法的 DOA 估计	87
3.9.1	阵列模型	87
3.9.2	谱搜索广义 ESPRIT 方法	88
3.9.3	无须搜索的广义 ESPRIT 算法	89
3.10	基于压缩感知理论的 DOA 估计	90
3.10.1	压缩感知理论的基础知识	90
3.10.2	基于压缩感知理论的 DOA 估计算法	95
3.11	相干信源 DOA 估计	95
3.11.1	空间平滑算法	97
3.11.2	改进的 MUSIC 算法 (IMUSIC)	98
3.11.3	基于 Toeplitz 矩阵重构的 ESPRIT-like 算法	99
3.11.4	任意阵列下的相干信号 DOA 估计	101
3.12	大规模均匀线阵下基于 DFT 技术的 DOA 估计算法	104
3.12.1	数据模型	105
3.12.2	基于 DFT 技术的低复杂度 DOA 估计算法	105
3.12.3	算法分析	107
3.12.4	仿真实验	110
	参考文献	112
第 4 章	二维空间谱估计	118
4.1	引言	118
4.2	均匀面阵中基于旋转不变性的二维 DOA 估计算法	119
4.2.1	数据模型	119

4.2.2	基于 ESPRIT 的二维 DOA 估计算法	121
4.2.3	基于 PM 的二维 DOA 估计算法	127
4.3	均匀面阵中基于 MUSIC 类的二维 DOA 估计算法	137
4.3.1	2D-MUSIC 算法	137
4.3.2	降维 MUSIC 算法	139
4.3.3	级联 MUSIC 算法	148
4.4	均匀面阵中基于三线性分解的二维 DOA 估计算法	153
4.4.1	数据模型	153
4.4.2	三线性分解	154
4.4.3	可辨识性分析	155
4.4.4	基于三线性分解的二维 DOA 估计	156
4.4.5	算法复杂度和优点	158
4.4.6	仿真结果	158
4.5	均匀面阵中基于压缩感知三线性模型的二维 DOA 估计算法	162
4.5.1	三线性模型压缩	162
4.5.2	三线性分解	163
4.5.3	可辨识性分析	164
4.5.4	基于稀疏恢复的二维 DOA 估计	165
4.5.5	算法复杂度和优点	166
4.5.6	仿真结果	167
4.6	双平行线阵中基于 DOA 矩阵方法的二维 DOA 估计算法	170
4.6.1	阵列结构和信号模型	170
4.6.2	DOA 矩阵方法	171
4.7	圆阵中的二维 DOA 估计算法	172
4.7.1	数据模型	172
4.7.2	波束空间转换	173
4.7.3	UCA-RB-MUSIC 算法	174
4.7.4	UCA-Root-MUSIC 算法	175
4.7.5	UCA-ESPRIT 算法	175
4.8	本章小结	176
	参考文献	177
第 5 章	传感器阵列中非圆信号的空间谱估计	179
5.1	引言	179
5.2	均匀线阵中基于 NC-ESPRIT 的非圆信号 DOA 估计算法	180

5.2.1	数据模型	180
5.2.2	NC-ESPRIT 算法	181
5.2.3	算法复杂度和优点	183
5.2.4	克拉美-罗界	183
5.2.5	仿真结果	187
5.3	非均匀线阵中基于降维 NC-Capon 的非圆信号 DOA 估计算法	189
5.3.1	数据模型	189
5.3.2	数据扩展	190
5.3.3	2D-NC-Capon 算法	191
5.3.4	降维 NC-Capon 算法	191
5.3.5	性能分析	193
5.3.6	仿真结果	195
5.4	非均匀线阵中基于降维 NC-MUSIC 的非圆信号 DOA 估计算法	199
5.4.1	2D-NC-MUSIC 算法	199
5.4.2	降维 NC-MUSIC 算法	200
5.4.3	性能分析	201
5.4.4	仿真结果	203
5.5	线阵中基于 NC-GESPRIT 的非圆信号 DOA 估计算法	206
5.5.1	数据模型	206
5.5.2	频谱搜索 NC-GESPRIT 算法	207
5.5.3	求根 NC-GESPRIT 算法	209
5.5.4	算法优点	209
5.5.5	仿真结果	210
5.6	本章小结	214
	参考文献	214
第 6 章	传感器阵列 DOA 跟踪	216
6.1	引言	216
6.2	L 型阵列中基于 PAST 的 DOA 跟踪算法	217
6.2.1	数据模型	217
6.2.2	PAST 算法	218
6.2.3	复杂度和 CRB	222
6.2.4	仿真结果	226
6.3	面阵中基于自适应 PARAFAC 的 DOA 跟踪算法	227
6.3.1	数据模型	228

6.3.2	PARAFAC-RLST 算法	229
6.3.3	复杂度和 CRB	233
6.3.4	仿真结果	233
6.4	线阵中基于 Kalman 滤波和 OPASTd 的 DOA 跟踪算法	235
6.4.1	数据模型	235
6.4.2	Kalman 滤波和 OPASTd 算法	236
6.4.3	复杂度和 CRB	240
6.4.4	仿真结果	241
6.5	本章小结	243
	参考文献	243
第 7 章	传感器阵列分布式信源定位	245
7.1	引言	245
7.2	线性阵列中基于 ESPRIT 的分布式信源定位算法	248
7.2.1	数据结构	248
7.2.2	基于 ESPRIT 的分布式信源定位算法	250
7.2.3	性能分析	253
7.2.4	仿真结果	254
7.3	线性阵列中基于 DSPE 的分布式信源定位算法	257
7.4	线性阵列中基于级联 DSPE 的分布式信源定位算法	258
7.4.1	基于级联 DSPE 的分布式信源定位算法	258
7.4.2	性能分析	260
7.4.3	仿真结果	261
7.5	线性阵列中基于广义 ESPRIT 的分布式信源定位算法	268
7.5.1	数据结构	268
7.5.2	基于广义 ESPRIT 的分布式信源定位算法	269
7.5.3	基于多项式求根的中心 DOA 估计方法	273
7.5.4	性能分析	275
7.5.5	仿真结果	279
7.6	平移不变阵列中基于快速 PARAFAC 的分布式信源定位算法	283
7.6.1	数据结构	283
7.6.2	基于快速 PARAFAC 的分布式信源定位算法	285
7.6.3	性能分析	289
7.6.4	仿真结果	291
7.7	本章小结	295