



宽带阵列信号 波达方向估计理论与方法

Wideband Array Signal Direction
of Arrive Estimation Theory and Methods

赵拥军 李冬海 赵 闯 胡德秀 刘成城 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

宽带阵列信号波达方向 估计理论与方法

Wideband Array Signal Direction of Arrive
Estimation Theory and Methods

赵拥军 李冬海 赵 闯 胡德秀 刘成城 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

宽带阵列信号波达方向估计理论与方法 / 赵拥军等
著. —北京:国防工业出版社, 2013. 8
ISBN 978 - 7 - 118 - 08679 - 9

I. ①宽... II. ①赵... III. ①数字信号处理 -
研究 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 170784 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)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

※

开本 710 × 1000 1/16 印张 18 字数 327 千字

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作

需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员	王 峰			
副主任委员	宋家树	蔡 镭	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	贺 明		
委 员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟
(按姓氏笔画排序)				
	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	邬江兴
	刘世参	芮筱亭	李言荣	李德仁
	李德毅	杨 伟	肖志力	吴有生
	吴宏鑫	何新贵	张信威	陈良惠
	陈冀胜	周一宇	赵万生	赵凤起
	崔尔杰	韩祖南	傅惠民	魏炳波

前 言

阵列信号处理是现代信号处理的一个重要分支,在近 40 年来得到迅速发展,其应用涉及雷达、声纳、通信、电子侦察、射电天文等军事与国民经济的众多领域。阵列信号处理是通过放置在空间不同位置的多个传感器形成的传感器阵列,对空间信号场进行感应接收(即并行空域采样)和处理,以提取阵列接收到的信号及其特征参数,同时增强所需的有用信号,抑制干扰和噪声。阵列信号处理主要是利用信号的空域特性对一些方向上的信号进行增强,对另外一些方向上的干扰和噪声进行抑制并提取信号的空域信息,因而常被称为空域信号处理。阵列信号处理与传统的测向方法相比较,具有波束控制灵活、空间分辨率高、信号增益高、抗干扰能力强等突出特点,它的两个最主要的研究方向是自适应阵列处理(即自适应空域滤波)和空间谱估计。自适应阵列处理的理论与技术已经比较成熟,并有很多实际系统得到广泛应用;而空间谱估计理论的产生要晚一些,但是其发展却非常迅速。空间谱估计技术与自适应阵列技术不同,它侧重于研究空间多传感器阵列所构成的处理系统,对感兴趣的信号的空间信号的多种参数进行准确的估计,其主要目的是估计信号的空域参数或信号源位置,而这恰恰是雷达、声纳、电子侦察等许多领域的重要任务,常规波束形成算法进行测向时其分辨力受瑞利限制。而从理论上说,阵列高分辨空间谱估计技术可以突破瑞利限制的约束,大幅度改善系统处理带宽内空间信号波达方向的估计精度、角度分辨率及其他相关参数精度,因而在雷达、通信、电子侦察等领域有着极为广阔的应用前景。

传统的阵列信号处理,针对的主要是窄带信号,相应的各种高分辨算法和快速算法已经比较成熟,窄带信号空间谱估计测向系统已经得到成功应用。然而,科技的迅猛发展,使得现代雷达、通信系统占据的信号频带越来越宽,宽带雷达、宽带通信系统应用更加广泛,信号环境越来越复杂,信号形式日趋多样,信号带宽与频率范围不断拓展,已有的各种窄带阵列测向处理系统日渐显现出不适应性。因此,迫切需要深入研究发展宽带信号的阵列处理理论与技术。国内外不少学者在窄带信号空间谱估计技术取得重要成绩的基础上,又开始了对宽带信号的研究,建立了宽带信号阵列处理模型,提出了许多适应宽带信号的性能优良的处理算法。但在宽带信号处理的研究中依然存在着大量未解决的问题,围绕这些问题国内外学者做了不懈的探索研究,特别是建立了基于时域模型的宽带

信号空间谱估计模型,相比于基于频域模型的宽带信号空间谱估计具有更好的估计性能及适应性。

本书重点介绍了基于阵列信号处理的宽带信号波达方向估计的概念、理论和方法。全书内容共分3篇。其中:第1篇包括第1、2章,介绍了空间谱估计基础;第2篇包括第3~7章,介绍了基于频域模型的宽带信号空间谱估计;第3篇包括第8、9章,介绍了基于时域模型的宽带信号空间谱估计。各篇及章节内容安排如下:

第1篇主要介绍阵列信号处理的相关基本知识,将读者引入到阵列信号及空间谱估计的领域,使读者对阵列信号处理建立一个基础,对其发展历程有一个整体的了解。本篇内容是后续各章节的基础。其中:第1章为绪论,简要评述了阵列信号处理以及高分辨空间谱估计的研究进展和现状,对阵列信号处理领域的重大突破性成就进行总结,对该领域的研究现状和发展方向进行概括,使读者能够了解阵列信号处理的整体概貌;第2章为空间谱估计的基本知识,主要介绍了阵列信号处理的基本原理、阵列信号模型、天线阵以及窄带信号空间谱估计等基础知识,由浅入深,逐步展现阵列信号处理以及空间谱估计的魅力所在。

第2篇重点论述了基于频域模型的宽带信号空间谱估计的最新研究成果,其中很大部分是作者长期从事宽带空间谱估计的研究成果。本篇内容散见于一些文献,在公开出版的书籍中尚未涉及。其中:第3章主要研究了基于宽带子空间的空间谱估计方法,包括宽带聚焦类信号波达方向(DOA)估计算法、基于多级维纳滤波(MSWF)技术的宽带DOA估计快速算法以及对冲击噪声条件下的宽带DOA估计等;第4章主要对宽带信号源数目估计进行了深入研究,并对各种方法进行了分析和归纳分类,得出了两类宽带信号源数目估计方法,即基于特征分解和基于盖氏圆半径的宽带信号源数目估计方法;第5章主要研究了基于波束域的空间谱估计,主要内容包括恒定束宽波束形成算法、空间重采样法、离散傅里叶变换(DFT)加权法和窗函数加权法,分析比较了这些恒定束宽波束形成法的性能;第6章主要研究了宽带循环空间谱估计,主要包括几种常用信号的循环平稳特性、基于循环平稳特性的窄带信号的DOA估计的经典算法、谱相关信号子空间拟合(SC-SSF)方法、相干宽带循环平稳信号的DOA估计等;第7章主要研究了宽带空间谱估计的快速算法,主要包括基于MSWF的快速子空间估计方法、基于主成分分析(PCA)神经网络的快速子空间估计方法以及基于波束间小生境遗传算法的空间谱优化搜索技术。

第3篇主要研究了基于时域模型的高分辨DOA估计方法。本篇内容是宽带高分辨DOA估计的最新研究成果,在国内几乎没有相关专著涉及有关内容,是本书的重要特色之所在。其中:第8章主要讨论了基于时差的阵列信号处理模型和蒙特卡罗方法。时域模型考虑到阵列接收宽带信号和窄带信号之间的一个共同点是相邻阵元信号的时延与信号的带宽没有关系,直接在时域建模,基于

带通信号重构理论建立了一种同时适用于宽带信号、窄带信号以及宽窄带混合信号的阵列信号处理时域模型;蒙特卡罗方法中深入研究了近年来被广泛应用于贝叶斯参数估计求解的马尔科夫链蒙特卡罗(MCMC)方法,给出了混合 MC-MC 方法和基于可逆跳转马尔科夫链蒙特卡罗方法(RJMCMC)的混合抽样技术;第9章主要讨论了基于时差模型的高分辨 DOA 估计方法,通过选取合适的先验分布得到未知参数的联合后验概率密度函数,给出基于混合 MCMC 方法的信号时延估计过程和基于混合 RJMCMC 方法的信号源数目和信号时延联合估计过程。

本书由赵拥军、李冬海、赵闯、胡德秀、刘成城撰写。书中部分算法实例和素材由张恒利、尤亚静、周林、王锋、王进等同志提供,在撰写过程中也得到他们的大力支持,在此对他们表示衷心感谢。我们尽自己的最大努力试图给出宽带信号阵列处理的发展历程和最新成果,然而阵列信号处理是一个发展非常迅速的领域,新的理论和技术层出不穷,本书不可能对这些发展与成果做出统揽无余的介绍和讨论。为此,本书在每章的最后都进行了总结和归纳,指出一些重要的新发展以供读者参考。鉴于著者水平有限,书中难免存在错误和疏漏,殷切希望广大读者批评指正。

著 者

目 录

第 1 篇 宽带阵列空间谱估计基础

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 窄带阵列信号波达方向估计的发展历程与现状	2
1.3 宽带阵列信号高分辨波达方向估计的研究现状	4
1.3.1 宽带信号源数目估计	5
1.3.2 聚焦类宽带信号高分辨 DOA 估计	7
1.3.3 基于信号子空间的快速参数估计	8
1.3.4 循环平稳信号高分辨 DOA 估计算法	9
1.3.5 宽带信号阵列误差校正	11
1.3.6 基于时域模型的高分辨波达方向估计	12
1.4 本书内容及结构安排	13
参考文献	14
第 2 章 空间谱估计基础	21
2.1 空间谱的概念	21
2.1.1 均匀直线阵的输入信号	21
2.1.2 均匀直线阵的空间频率	23
2.1.3 均匀直线阵信号方向矢量	24
2.1.4 任意阵列信号方向矢量	27
2.1.5 均匀直线阵的空间傅里叶变换	28
2.1.6 任意阵的空间谱	32
2.1.7 空间傅里叶变换的空间分辨率	33
2.2 阵列信号数学模型	37
2.2.1 阵列天线方向矢量	38
2.2.2 窄带信号模型	43
2.2.3 窄带信号阵列接收模型	44
2.2.4 相干信号模型	47
2.2.5 宽带信号模型	47

2.2.6	宽带信号阵列接收模型	48
2.2.7	加性噪声模型	50
2.2.8	接收信号矢量协方差矩阵	51
2.2.9	协方差矩阵特征值分解	52
2.2.10	接收信号矢量在特征矢量上投影	53
2.3	基于波束形成的空间谱估计	53
2.3.1	常规波束形成方法	53
2.3.2	最小方差波束形成方法	55
2.3.3	分辨力对比分析	56
2.4	多重信号分类算法	57
2.4.1	信号方向矢量与特征矢量的关系	58
2.4.2	信号子空间与噪声子空间	59
2.4.3	MUSIC 算法的基本原理	61
2.4.4	分辨力对比分析	63
	参考文献	64

第 2 篇 频域宽带阵列信号波达方向估计

第 3 章	宽带信号子空间类算法	65
3.1	ISM 算法	65
3.2	CSM 类算法	67
3.2.1	CSM 聚焦矩阵的构造方法	68
3.2.2	TCT 算法	69
3.2.3	SST 算法	71
3.2.4	LS 类算法	73
3.2.5	算法性能比较分析	75
3.3	自聚焦 CSM 类算法	77
3.3.1	RSS 算法原理	78
3.3.2	单一目标的 AF - CSM 算法	79
3.3.3	多目标的 AF - CSM 算法	81
3.3.4	仿真实验	82
3.4	小结	84
	参考文献	84
第 4 章	宽带信号源数目估计	86
4.1	引言	86
4.2	基于特征分解的宽带信号源数目估计	87

4.2.1	噪声特征值的统计特性	88
4.2.2	宽带相干信号源数目估计	89
4.2.3	性能仿真	97
4.3	基于盖氏圆半径的宽带信号源数目估计	99
4.3.1	盖氏圆方法	100
4.3.2	盖氏圆半径的宽带信号源数目估计方法	103
4.3.3	性能仿真	104
4.4	小结	106
	参考文献	107
第5章	宽带波束域 DOA 估计	109
5.1	引言	109
5.2	波束域窄带 DOA 估计	109
5.2.1	窄带波束域算法	109
5.2.2	窄带波束域算法的性能分析	110
5.3	波束域宽带 DOA 估计	114
5.3.1	宽带恒定束宽波束形成器的概念	114
5.3.2	宽带恒定束宽波束形成方法	115
5.3.3	宽带恒定束宽波束形成方法的性能比较	120
5.3.4	宽带恒定束宽波束 DOA 估计方法	123
5.4	小结	137
	参考文献	138
第6章	宽带循环平稳信号 DOA 估计	140
6.1	引言	140
6.2	常用信号的循环平稳特性	141
6.2.1	循环平稳信号的特性	141
6.2.2	循环平稳信号的定义	141
6.2.3	循环相关函数	142
6.2.4	循环谱	144
6.2.5	循环平稳性的定义	146
6.2.6	循环平稳理论的优点	146
6.2.7	计算机仿真及结果分析	147
6.3	宽带循环平稳信号的 DOA 估计	149
6.3.1	宽带信号模型	149
6.3.2	谱相关传播算子法	151
6.3.3	谱相关求根多级维纳滤波算法	157
6.4	相干宽带循环平稳信号的 DOA 估计	165

6.4.1	人工神经网络简介	165
6.4.2	宽带相干信号情况下的 DOA 估计算法	167
6.5	小结	173
	参考文献	174
第 7 章	宽带快速 DOA 估计算法	176
7.1	引言	176
7.2	基于 MSWF 的宽带快速 DOA 估计	176
7.2.1	MSWF 的基本原理	176
7.2.2	基于 MSWF 的快速子空间估计	179
7.2.3	基于 MSWF 的宽带快速 DOA 估计	180
7.2.4	仿真实验与结果分析	181
7.3	基于 PCA 神经网络的宽带快速 DOA 估计	184
7.3.1	主成分分析	184
7.3.2	基于人工神经网络的 PCA	185
7.3.3	基于 PCA 神经网络的子空间估计	187
7.3.4	基于 PCA 神经网络的宽带 DOA 估计	190
7.3.5	仿真实验与结果分析	190
7.4	基于遗传算法的谱峰搜索技术	195
7.4.1	遗传算法的基本原理	195
7.4.2	空间谱谱峰搜索	197
7.4.3	基于 GA 的谱峰优化搜索	198
7.4.4	基于波束间 NGA 的谱峰优化搜索	200
7.4.5	基于波束间 NGA 和爬山搜索相结合的混合搜索	201
7.4.6	仿真实验与结果分析	202
7.5	小结	206
	参考文献	207

第 3 篇 时域宽带阵列信号波达方向估计

第 8 章	时域阵列信号处理模型和蒙特卡罗方法	209
8.1	引言	209
8.2	时域阵列信号模型	210
8.2.1	带通信号采样与重构	210
8.2.2	一维信号模型	212
8.2.3	K 维信号模型	215
8.2.4	模型特性	217

8.3 蒙特卡罗方法	218
8.3.1 蒙特卡罗积分	219
8.3.2 重要性抽样	220
8.3.3 马尔科夫链蒙特卡罗方法	220
8.4 小结	230
参考文献	230
第9章 基于时域模型的高分辨波达方向估计	232
9.1 引言	232
9.2 贝叶斯定理	232
9.3 贝叶斯高分辨估计方法原理及性能分析	233
9.3.1 信号模型	233
9.3.2 贝叶斯后验概率密度函数理论推导	234
9.3.3 化简后验概率密度函数	235
9.3.4 信号恢复	237
9.3.5 性能分析	238
9.4 基于混合 RJMCMC 的信号源数和 DOA 联合估计方法	239
9.4.1 信号源数目已知时的 DOA 估计方法	239
9.4.2 信号源数目与 DOA 联合估计方法	252
9.5 小结	261
参考文献	262
附录 CRLB 的推导过程	264

Contents

Part 1 Basis of Wideband Spatial Spectrum Estimation

Chapter 1 Preface	1
1.1 Introduction	1
1.2 Overview of Direction-of-arrival Estimation of Narrowband Array Signal	2
1.3 Overview of Direction-of-arrival Estimation of Wideband Array Signal	4
1.3.1 Number of Wideband Signal Estimation	5
1.3.2 High Resolution DOA Algorithms for Wideband Focusing Signal	7
1.3.3 Fast Parameter Estimation Methods Based on Signal Subspace	8
1.3.4 High Resolution DOA Estimation Algorithms for Cyclo-stational Signal	9
1.3.5 Array Calibration Methods for Wideband Signal	11
1.3.6 High Resolution DOA Estimation Algorithms Based on Temporal Domain Model	12
1.4 Structure and Content	13
References	14
Chapter 2 Basis of Spatial Spectrum Estimation	21
2.1 Conception of Spatial Spectrum	21
2.1.1 Imping Signals of Uniform Linear Array	21
2.1.2 Spatial Frequency of Uniform Linear Array	23
2.1.3 Signal Steering Vector of Uniform Linear Array	24
2.1.4 Signal Steering Vector of Arbitrary Array	27
2.1.5 Spatial FFT of Uniform Linear Array	28
2.1.6 Spatial Spectrum of ArbitraryArray	32
2.1.7 Resolution of Spatial FFT	33
2.2 Mathematics Model of Array Signal	37
2.2.1 Array Steering Vector	38
2.2.2 Narrowband Signal Model	43

2.2.3	Array Received Model for Narrowband Signals	44
2.2.4	Coherent Signals Model	47
2.2.5	Wideband Signals Model	47
2.2.6	Array Received Model for Wideband Signals	48
2.2.7	Additive Noise Model	50
2.2.8	Covariance Matrix of Received Signal Vectors	51
2.2.9	Eigenvalue Decomposition of Covariance Matrix	52
2.2.10	Received Signal Vectors' Projection on Eigenvector	53
2.3	Spatial Spectrum Estimation Based on Beamforming	53
2.3.1	Conventional Beamforming Methods	53
2.3.2	Beamforming Methods Based on Minimum Variance	55
2.3.3	Resolution Comparative Analysis	56
2.4	Multiple Signal Classification	57
2.4.1	Relation Between Signal Steering Vector and Eigenvector	58
2.4.2	Signal Subspace and Noise Subspace	59
2.4.3	Basic Principles of MUSIC	61
2.4.4	Resolution Comparative Analysis	63
References		64

Part 2 Wideband Array Signal DOA Estimation in Frequency Domain

Chapter 3	Subspace Class Algorithm of Wideband Signals	65
3.1	ISM Methods	65
3.2	CSM Class Methods	67
3.2.1	CSM Focusing Matrix Method	68
3.2.2	TCT Class Algorithm	69
3.2.3	SST Class Algorithm	71
3.2.4	LS Class Algorithm	73
3.2.5	Compare of Algorithms Based on Simulation	75
3.3	Self-focus CSM Class Algorithm	77
3.3.1	Principle of RSS	78
3.3.2	AF-CSM Self-focus Algorithm of Single Signal	79
3.3.3	AF-CSM Self-focus Algorithm of Multiple Signals	81
3.3.4	Computer Simulation	82
3.4	Summary	84

References	84
Chapter 4 Estimation of the Number of Wideband Signals	86
4. 1 Introduction	86
4. 2 Estimating the Number of Wideband Signals Based on EVD	87
4. 2. 1 Statistical Property of the Noise Eigenvalues	88
4. 2. 2 Estimating the Number of Wideband Signals the Theory of CSM	89
4. 2. 3 Computer Simulation	97
4. 3 Estimating the Number of Wideband Signals on Gerschgorin radii ...	99
4. 3. 1 Methods of Gerschgorin radii	100
4. 3. 2 Method on Estimating the Number of Wideband Signals on Gerschgorin radii	103
4. 3. 3 Computer Simulation	104
4. 4 Summary	106
References	107
Chapter 5 Beamspace DOA Estimation	109
5. 1 Introduction	109
5. 2 Narrowband Beamspace DOA Estimation	109
5. 2. 1 Narrowband Beamspace Algorithm	109
5. 2. 2 Performance Analysis of Narrowband Beamspace Algorithm	110
5. 3 Wideband Beamspace DOA Estimation	114
5. 3. 1 Wideband Frequency Invariant Beamformer Concept	114
5. 3. 2 Wideband Frequency Invariant Beamformer Methods	115
5. 3. 3 Performance Comparison of Wideband Frequency Invariant Beamformer Methods	120
5. 3. 4 Wideband DOA Estimation based on Frequency Invariant Beamformer	123
5. 4 Summary	137
References	138
Chapter 6 Wideband DOA Estimation Based on Cyclostationarity	140
6. 1 Introduction	140
6. 2 Cyclostationarity of Common Signals	141
6. 2. 1 Characteristic of Cyclostationary Signals	141
6. 2. 2 Definition of Cyclostationary Signals	141
6. 2. 3 Cyclic Correlation Function	142
6. 2. 4 Cyclic Spectrum	144
6. 2. 5 Definition of Cyclostationarity	146