




稳健空间谱估计技术 及其应用




宋海岩 时洁 刘伯胜 著

 哈尔滨工程大学出版社

稳健空间谱估计技术及其应用

宋海岩 时 洁 刘伯胜 著

 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

空间谱估计技术是阵列信号处理研究领域中的重要分支,广泛应用于射电天文、医学诊断、雷达、通信、声呐、地震遥感等众多领域。本书系统地论述了空间谱估计技术的基本理论及典型算法,并从算法本身对噪声、干扰等因素的抑制能力以及算法对环境的适应性两方面出发,着重讨论了提高空间谱估计算法稳健性的基本途径和方法。全书由7章组成,主要内容包括阵列信号处理的基本概念、空间谱估计技术的基础理论与典型算法、基于联合对角化的空间谱估计方法、稳健自适应波束形成算法、基于模型匹配思想的浅海目标稳健方位估计方法等。

本书可供从事雷达、声呐、通信等领域的广大技术人员学习与参考,也可作为高等院校和科研院所信息科学与技术等学科的高年级本科生、研究生教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

稳健空间谱估计技术及其应用/宋海岩,时洁,刘伯胜著.
—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2014.6
ISBN 978-7-5661-0815-9

I. ①稳… II. ①宋… ②时… ③刘… III. ①空间谱
—谱估计—研究 IV. ①TN011

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 119982 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 14
字 数 335 千字
版 次 2014 年 6 月第 1 版
印 次 2014 年 6 月第 1 次印刷
定 价 30.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn



前 言

空间谱估计技术是阵列信号处理的一个重要分支,广泛应用于雷达、声呐、通信、勘探、医学工程等众多军事及国民经济领域。随着科学技术的不断发展和深化,空间谱估计技术凸显出旺盛的生命力和巨大的发展潜力,新理论、新算法日新月异,层出不穷,在各个相关领域发挥着越来越重要的作用。

目前,在实际工程应用中,如何提高空间谱估计算法在短快拍数、低信噪比、强干扰、大误差等条件下的稳健性能,受到广大专家学者的高度重视,稳健空间谱估计技术已取得了丰硕的研究成果,并且国内外已出版了不少深受广大读者喜爱的与稳健空间谱估计技术相关的书籍。本书试图从一个新的角度,即从算法本身对噪声、干扰等因素的抑制能力以及算法对环境的适应性两方面出发,构筑论述稳健空间谱估计技术的一个新体系,目的是使从事空间谱估计、阵列信号处理等专业研究领域的科技人员或高等院校师生通过本书掌握空间谱估计的基本概念和理论,特别是稳健空间谱估计技术。

本书共分7章,其主要内容包括:第1章绪论,介绍了空间谱估计技术的发展及其稳健性研究现状。第2章阵列信号处理基础,介绍了阵列系统结构、阵列信号模型、传统波束形成、统计最优波束形成等基本概念。第3章空间谱估计基础理论与方法,论述了经典的空间谱估计算法,具体包括传统波束形成器、最小方差无畸变波束形成器、线性预测法、最大似然估计法、子空间分解类高分辨空间谱估计方法、波达方向瞬时成像法、矩阵束算法等。第4章基于联合对角化的空间谱估计方法,针对利用统计信息的不同,分别介绍了基于二阶累积量联合对角化的空间谱估计方法和基于高阶累积量联合对角化的空间谱估计方法,并通过计算机仿真实验分析讨论算法的性能。第5章稳健自适应波束形成,首先,介绍自适应波束形成器的失配现象并分析导致其性能退化的原因;其次,介绍经典的稳健自适应波束形成方法及其基本原理,具体包括线性约束最小方差法、特征子空间法及对角加载法;然后,介绍凸优化理论和二阶锥规划概念,并在此基础上,研究并讨论基于二阶锥规划的稳健自适应波束形成方法,具体包括权矢量模约束稳健自适应波束形成方法、最差性能最优稳健自适应波束形成方法及基于矢量最优化的稳健自适应波束形成方法;最后,通过计算机仿真实验及试验数据处理进一步对比分析各算法的性能。第6章基于模型的阵列信号处理,从基于模型的信号处理基础理论入手,结合典型水声声场计算模型,重点介绍几种基于模型的阵列处理方法——匹配场处理技术、聚焦波束形成技术以及时反波束形成技术等。第7章浅海目标稳健方位估计,首先,介绍水声信道特性及多途效应对阵列信号处理性能的影响;其次,分别基于简正波理论和射线理论建立浅海阵列信号模型,并在此基础上,结合基于模型的阵列信号处理思想,讨论稳健浅海目标方位估计方法;最后,通过计算机仿真实

验进一步分析各算法的性能。

本书由宋海岩、时洁、刘伯胜合著,其中第1,4,5,7章由宋海岩著,第2,3章由时洁著,第6章由刘伯胜、时洁合著。

本书的第一作者在攻读博士学位期间,在空间谱估计领域得到导师朴胜春教授的悉心指导,在此向他表示衷心的感谢。同时,向为本书出版提供大力支持,并提出宝贵意见的专家、学者们表示感谢。

本专著获得了中国教育部博士点基金(No. 20122304120011),黑龙江省科技厅青年科学基金(No. QC2014C079)及黑龙江省教育厅面上项目(No. 12541657)的资助。

由于作者理解水平和能力有限,书中选材和叙述未免有不妥之处,恳请诸位专家、同仁和广大读者不吝赐教,批评指正。

著 者

2014年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 空间谱估计技术的发展及其稳健性研究现状	1
1.3 本书结构和内容	7
第 2 章 阵列信号处理基础	9
2.1 引言	9
2.2 阵列系统	9
2.3 阵列信号模型	11
2.4 传统波束形成	18
2.5 统计最优波束形成	23
2.6 本章小结	29
第 3 章 空间谱估计基础理论与方法	30
3.1 引言	30
3.2 Bartlett 波束形成器	31
3.3 最小方差无畸变波束形成器	31
3.4 线性预测法	32
3.5 最大似然估计法	33
3.6 子空间分解类高分辨空间谱估计方法	34
3.7 波达方向瞬时成像法	39
3.8 矩阵束算法	47
3.9 本章小结	58
第 4 章 基于联合对角化的空间谱估计方法	61
4.1 引言	61
4.2 基于二阶累积量联合对角化的空间谱估计方法	61
4.3 基于高阶累积量联合对角化的空间谱估计方法	68
4.4 本章小结	74
第 5 章 稳健自适应波束形成	76
5.1 引言	76
5.2 自适应波束形成器的失配及性能退化	76
5.3 经典稳健自适应波束形成	79
5.4 凸优化理论与应用	83

5.5	基于二阶锥规划的稳健自适应波束形成	86
5.6	本章小结	117
第6章	基于模型的阵列信号处理	119
6.1	引言	119
6.2	基于模型的信号处理(MBP)基本思想	119
6.3	基于模型的信号处理方法(MBP)	120
6.4	典型水声声场计算模型及适用条件	126
6.5	基于模型数据匹配的相干信息处理	130
6.6	基于模型的浅海声源近程定位	144
6.7	本章小结	154
第7章	浅海目标稳健方位估计	155
7.1	引言	155
7.2	水声信道特性	155
7.3	多途效应对阵列信号处理性能的影响	158
7.4	浅海阵列信号模型	161
7.5	多途效应对传统方位估计的影响	168
7.6	基于射线理论的浅海稳健方位估计方法	177
7.7	基于简正波理论的浅海稳健方位估计方法	186
7.8	本章小结	197
附录	198
参考文献	204

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

阵列信号处理也称为空-时处理,广泛应用于射电天文、医学诊断、雷达、通信、声呐、地震遥感等众多领域,其主要功能是捕获空间中传播的信号,并根据不同的需求及目的,对阵列采集到的信号进行时域及空域分析和处理,最终获得我们所需要的或可以利用的信息。例如:

- (1)在雷达、声呐领域中,对目标进行空间定位;
- (2)在通信领域中,对源信号波形进行估计;
- (3)在地质勘探、地震遥感领域中,对源信号特征进行提取;
- (4)在医学诊断中,对待诊断目标进行医学成像。

阵列信号处理的研究内容主要包括常规波束形成、自适应波束形成、信源个数估计、阵列校准、目标参数估计(方位、时延、多普勒频移)等。其中,空间目标的方位估计问题是阵列信号处理领域中的基本问题,也是研究热点之一,相关技术在近几十年中得到了迅猛发展。从统计估计理论范畴上来讲,目标方位估计属于参数估计问题,是时域信号频谱估计向空域方位估计的拓展,故也称为空间谱估计。

在自然界和人类社会生产活动中,利用空间分布的传感器阵列接收目标信号,继而为目标进行方位估计,早已得到广泛应用。例如,蝙蝠能通过口腔或鼻腔把从喉部产生的超声波发射出去,利用灵敏的耳朵接收反射的声音回波,进而对前方物体进行定向,保证其在完全黑暗中,以极快的速度精确地飞翔,从不会同前方的物体相撞。声呐通过水声换能器基阵接收水中目标反射的回波(主动声呐)或舰船等水中目标产生的辐射噪声(被动声呐),进而测定水下目标的方位,保证自身航行的安全,同时也使武器装备的精确打击成为可能。

然而,随着人类对工程技术的不断探索和发展,对方位估计结果的准确性、有效性、实用性提出了更高的要求,继而要求进一步提高现有方位估计算法在低信噪比、短快拍、强干扰等条件下的性能,这正是现阶段方位估计算法所要研究的主要内容,具有重要的科学意义和工程实用价值。

1.2 空间谱估计技术的发展及其稳健性研究现状

1.2.1 空间谱估计技术的发展

最早的空间谱估计技术为常规波束形成(Conventional Beamforming, CBF),指将一定几何形状(直线、平面、圆柱等)排列的多元基阵各阵元输出经过处理(如加权、延时、求和等)形成空间指向性的方法。该技术可追溯至第二次世界大战期间,是傅里叶变换频谱分析向空域的扩展,具有运算简单、实用性强等优点。然而,该技术本身受瑞利限(Rayleigh

Limitation)限制,即空间分辨力受阵列孔径的约束,无法分辨瑞利限以内的空间目标。因此,如何克服瑞利限限制曾成为广大研究者研究的热点,促进了空间谱估计技术的发展。

从理论上来说,空间谱估计是时间谱估计由时域向空域的拓展,因此将时域非线性高分辨类谱估计方法推广至空间谱估计方法成为重要的研究方向。

线性预测法(Linear Prediction, LP)最早出现在时域信号分析中,其基本思想是根据已知序列估计将来或过去时间序列,该方法借助于预测滤波器和预测误差滤波器来实现。1967年, Burg首次将该线性预测法推广至空间谱估计中,用于估计信号的入射方向,这就是著名的最大熵谱法(Maximum Entropy Method, MEM)。

从统计时间信号处理的角度看,使无偏估计量的方差最小的估计器称为最小方差估计器。1969年, Capon将该估计器由时域推广至空域处理,提出了最小方差法(Minimum Variance Method, MVM),也称为标准Capon(Standard Capon Beamforming, SCB)或最小方差信号无畸变响应法(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR),该方法可在保持来波方向信号能量不变的前提下,使波束内其他方向的能量最小化,具有可同时获得较高的分辨力以及较强噪声干扰抑制的能力。

20世纪70年代初期, Pisarenko谐波分析法、波达方向瞬时成像法(Computed Angle-of-Arrival Transient Imaging, CAATI)及矩阵束法(Matrix Pencil, MP)等算法也在高分辨空间谱估计技术中得到了广泛应用,这类方法属于谐波恢复类算法,不受相干源限制,可在单次快拍基础上实现高精度的方位估计,满足实时性要求,但该类算法受噪声影响较大。

1979年, R. O. Schmidt等人提出了多重信号分类MUSIC算法,引起人们对子空间类算法的广泛兴趣,促进了子空间类算法的兴起,开启了高分辨空间谱估计技术的新纪元。子空间类算法的另一个典型代表是由Roy, Paulraj提出的旋转子空间不变法(ESPRIT), ESPRIT算法与MUSIC算法的共同特点是通过对阵列接收信号进行特征分解,将接收数据划分为两个相互正交的子空间——信号子空间和噪声子空间。不同之处是, MUSIC利用两空间的正交性构造出尖锐的空间谱峰,从而提高算法的空间分辨能力;而ESPRIT则是利用旋转不变子空间对信号入射方向进行估计。两种算法在信噪比足够高,数据快拍数足够多的条件下,可以获得高分辨性能。随着人们对子空间类算法的深入研究,形成了很多推广形式,如加权MUSIC(WMUSIC)算法、求根MUSIC(Root-MUSIC)算法,实值空间ESPRIT算法、矩阵对或矩阵束ESPRIT算法等。

众所周知,贝叶斯估计方法是基于统计理论的一种经典方法,适用于有关参数估计问题,而最大似然(ML)估计方法就是贝叶斯方法的一种特例,是在已知白噪声情况下的贝叶斯最优估计。在ML算法中,观测所得信号的似然函数被定义为含有未知参数的条件概率密度函数,目的是选定未知的参数以使得该似然函数尽可能大,通过最大化似然函数求出的解都被认为是未知参数的一个估计。1988年, Ziskind L与Max M讨论了将最大似然参数估计方法应用于波达方向估计,其后, ML算法在空间谱估计领域中取得了大量的研究成果。与MUSIC等子空间分解类算法相比, ML算法的估计性能优良,具有很好的鲁棒性和稳定性,尤其是低信噪比、小快拍数据情况下, ML算法比MUSIC及其他的子空间分解类算法性能好得多。另外, ML算法在相干源情况下仍能有效估计,而此时子空间分解类算法若不作特别处理则失效。然而方向估计似然函数是非线性的,求解其最优解需进行多维搜索,运算量是非常巨大的。

至今,随着微电子、计算机等技术的发展,广大研究学者在空间谱估计方面的研究日新

月异,涌现出了大量的新思想、新方法,取得了长足的进步。在空间谱估计方面的研究还包括波束域高分辨阵列信号处理、宽带信号空间谱估计、循环平稳信号的空间谱估计、基于高阶累积量的空间谱估计等。

1.2.2 稳健空间谱估计技术研究现状

虽然空间谱估计技术已取得了丰硕的研究成果,然而在实际工程应用中,空间谱估计方法的性能在很大程度上依赖于采样快拍数、信噪比、干扰、模型误差等因素,在短快拍数、低信噪比、强干扰、大误差等条件下,空间谱估计方法的性能将出现明显下降,即存在稳健性问题。概括而言,算法稳健性问题大体可分为两个方面:

(1)算法结构本身对噪声、干扰等因素的抑制能力有限,导致稳健性较差。例如,子空间类高分辨空间谱估计算法(以 MUSIC 为代表)在实现过程中需要特征分解,寻找并分离信号子空间和噪声子空间。然而,当信噪比较低时,信号与噪声能量相差不大,难以区分信号子空间和噪声子空间,最终导致算法估计精度下降,稳健性变差。

(2)算法无法适应特殊环境(如多途信道等),导致稳健性较差。例如,在浅海环境下,声信道是一个包括海面、海底和海水介质的复杂环境,任何一点接收到的声信号都是经不同途径传播的声信号的叠加,即所谓的多途效应。对于浅海方位估计问题而言,多途效应的存在会导致传统方位估计方法存在较大的估计偏差,在某些情况下,甚至会导致谱峰分裂现象,严重影响声呐系统的正常工作。

因此,如何提高算法本身对噪声、干扰等因素的抑制能力以及改善算法对环境的适应性,是空间谱估计方法走向工程实用化的技术难题,也是其工程实用化的关键环节。20世纪90年代以来,空间谱估计技术与优化理论、信息论等相关学科密切结合,提出了很多改善空间谱估计方法稳健性的新理论和方法。在改善算法本身结构方面,主要包括联合对角化、稳健自适应波束形成、酉变换、虚拟阵列、波束域等技术。在改善算法环境模型适应性方面,主要延续基于模型的信号处理思想,具体包括基于模型的匹配场处理、时间反转镜等。下面对具有代表性的几种典型方法进行简要介绍。

1. 联合对角化

从数学角度看,联合对角化实质上是特征值分解的一种推广,其目的是使多个矩阵同时对角化。依据对角化矩阵是否为正交矩阵,联合对角化可以分为正交联合对角化和非正交联合对角化。最早应用联合对角化技术的信号处理领域是盲源分离,对源信号的统计独立性假设会导致由混合信号的统计量组成的某些矩阵具有特定的联合对角化结构,通过恢复这种联合对角化结构可以求解盲信号分离问题。其后联合对角化技术被广泛应用于频率估计、时延估计、近场源参数估计、盲波束形成、谐波恢复、多输入多输出(MIMO)盲均衡以及盲 MIMO 系统辨识中。

在空间谱估计中,通过对空时相关矩阵或高阶累积量矩阵构造合适的联合对角化结构,可有效抑制噪声干扰的影响,提高高分辨方位估计方法的稳健性。1997年, Amin 等人利用空时相关矩阵组的联合对角化结构,提出一种能够有效分离并估计信号子空间和噪声子空间的新方法,该方法成功推广至所有子空间类空间谱估计算法。2006年,蒋飏利用 Jacobi 旋转矩阵法对一组空时相关矩阵组联合近似对角化,用联合对角化特征向量矩阵和特征值修正 MUSIC(Multiple Signal Classification)等子空间算法,在相关噪声场中能够显著地减小了方位估计方差,提高了估计性能。2009年,曾文俊等人基于四阶累积量矩阵联合

对角化结构,提出一种针对非高斯信源的方位估计方法,该方法不仅无需预先确定信源个数,而且能够有效抑制空间相关噪声,显著提高了方位估计算法的性能。

除此之外,还有很多学者在联合对角化空间谱估计方面作出了突出贡献,涌现出大量研究成果和文献。

2. 稳健自适应波束形成

自适应波束形成也称为统计最优波束形成,该方法通过调整权矢量来改变阵列的方向图,使波束主瓣对准期望信号,旁瓣和零陷对准干扰信号,能够有效地增强期望信号,抑制干扰信号,从而提高阵列输出信干噪比。

统计最优波束形成器的早期雏形是多旁瓣相消器(Multiple Sidelobe Canceller, MSC),该处理器是由一个高增益的主通道及一个或多个低增益的辅助通道组成,可在多个方向形成旁瓣零陷,但该处理器的主瓣和零陷方向需预先设定,不具有自适应调节能力,实际工程应用灵活性差。随着统计信号处理技术的发展,研究者们将自适应技术引入阵列信号处理领域,以实现某一准则下空间信号的最佳接收,优化阵列输出结果的同时达到空域滤波的目的。至此出现了真正意义上的统计最优波束形成技术,其中的典型代表包括:以输出信号和期望信号误差均方值最小的最小均方误差(MMSE)准则;以输出期望信号功率与噪声及干扰功率之比最大为准则的最大信干噪比(MSINR)准则;在确保所需信号无衰减接收的情况下,使输出功率最小的最小噪声方差(MNV)准则(著名的标准Capon波束形成器实际上就是最小噪声方差准则条件下的波束形成器)。

然而,稳健性问题长期以来一直是自适应波束形成面临的主要难题,由于导向矢量的失配、有限采样效应等因素的影响,致使自适应波束形成算法性能严重下降,制约了其在实际工程中的应用。Harry L. Van Trees在专著中定义稳健波束形成是指存在失配情况下仍试图保持良好性能的波束形成器,对于高分辨算法而言,需要在允许的失配条件下,其性能不能低于常规波束形成器。

在过去的30多年里,改善自适应波束形成稳健性的方法层出不穷,典型算法包括:线性约束最小方差波束形成,通过增加适当的约束条件,从而提高算法的稳健性;基于对角加载的波束形成,在数据协方差矩阵上施加一个对角矩阵,从而克服小特征值发散造成的波束畸变;基于特征子空间的波束形成,该方法摒弃自适应权矢量在噪声子空间的分量,仅保留在信号子空间中的分量,从而提高波束形成的性能。

近几年,随着研究的深入,广大学者们不仅从更深层次上提出了许多物理意义更加明确的稳健性准则,而且从优化求解方法上,采用了收敛速度快、计算精度高的内点法,克服了以往采用的最速下降法、共轭梯度法、LMS法等算法收敛速度慢、计算效率不高等缺点。

2003年,Vorobyov等人研究小组首次提出了基于最差性能最优的稳健波束形成法,该准则直接利用导向向量不确定性的信息,适用于任何类型的信号导向矢量失配问题,该方法将非凸优化问题转化成凸二阶锥规划问题,进而利用Sedumi求解最优权矢量,达到提高自适应波束形成稳健性的目的。在此基础上,该研究团队进一步提出基于约束概率的稳健自适应波束形成,克服算法对误差的敏感性,并将该问题转化成非线性凸优化问题,最终通过内点法有效求解。与此同时,Li Jian等人采用协方差矩阵拟合的方法求解相同准则但不同表述的优化问题,该方法以信源功率为目标函数,附加了导向矢量范数恒定的约束条件。除此之外,广大研究者结合实际工程需要,还提出了许多新的优化准则进而提高算法的稳健性,如最大输出信干噪比优化准则、多约束优化准则等。

广大学者在深入讨论和研究各种稳健自适应波束形成算法准则的同时,还从更广泛的角度对算法进行应用拓展。例如,宽带稳健自适应波束形成算法,包括恒定束宽算法、宽零陷波束形成算法等,阵型校正,相干信源估计,稳健四阶累积量盲自适应波束形成算法等。稳健自适应波束形成算法在工程应用中的迫切需求,促使广大学者对其各方面性能进行了深入分析和讨论。

2006年,林静然、彭启琮等人对最坏情况下的鲁棒自适应波束形成算法的性能进行了分析,给出了最优对角加载的近似表达式,随后进一步研究具有双重鲁棒性的自适应波束形成算法,以克服有限采样效应和方向矢量误差引起的波束性能下降,得出了最优加载因子的近似表达式,揭示了影响最优加载因子的各个因素。2008年,廖桂生等人详细分析了模不等式约束 Capon 波束形成器(NICCB)解的存在情况,给出了 NICCB 中模不等式约束参数的选择范围,并提出模等式约束 Capon 波束形成器(NECCB)。随后,该研究团队研究发现基于最差性能最优的稳健波束形成算法可以等价转换成加载样本矩阵求逆(LSMI)算法,故提出了一种新的求解方法,准确地计算出 Lagrange 乘数,给出了 LSMI 算法中的最优加载量,解决了对角加载技术中加载量估计难题。2009年,戴凌燕、王永良等人分析讨论了基于不确定集的稳健 Capon 波束形成算法,推导了期望信号导向矢量属于球形不确定集时的自适应权矢量近似闭式解,并对此进行性能评估,明确各种因素对性能的影响关系。

至今,稳健自适应波束形成算法方面的研究仍然是一个重要方向,还有很大的潜力可以挖掘。

3. 基于模型的信号处理

近年来,随着研究的深入,基于模型的信号处理方法(Model Based Processing, MBP)受到了广大学者的青睐,该方法广泛应用于图像、语音、声呐、雷达等相关领域,其实质是将信号物理模型、规律等先验知识融入信息处理框架,最大限度地提高处理器的性能,最终提取并得到我们所需的有用信息。水下声信号处理是该方法的典型应用领域,其核心思想是设计一种能够融合海洋传播模型并且可以用来完成各种各样功能(如滤波、定位、跟踪、声速估计或者反演等)的信号处理器。

早期,水声信号处理主要是以传统的信号处理方法来解决水声信号的检测、估计等问题,比如功率谱估计、匹配滤波理论等。但这些方法不能充分体现海洋信道的复杂性、背景噪声的非平稳性等海洋环境特征,导致处理增益下降。随着基于模型的信号处理思想的引入,MBP 方法将海洋声传播的物理模型和信号处理技术有机地融合到一个统一的框架之中,与一般的信号处理手段相比,能够提供更多更有效的信息,所以在环境恶劣的条件下(低信噪比、强干扰等条件下)能够有效改善处理器的性能,得到较为理想的处理结果。

MBP 思想在水声信号处理领域的雏形最早体现在 1966 年 Clay 的研究中,他建议利用匹配水声波导的模型函数来估计声源的深度。1973 年,Hinich 提出了将传播模型融入到信号处理框架中的这一思想,并利用该思想解决了声源的深度估计问题。1976 年,Bucker 提出了匹配场处理的概念(Matched Field Processing, MFP),该方法是将测量场和利用传播模型预报的声场进行比对,来估计声源的距离和深度。从本质上讲,MFP 方法融入了固定的(参数化的)水下声传播模型,属于 MBP 中的一种特例。随后,人们对 MFP 进行了广泛的研究,对 MFP 方面的研究内容进行了很好的总结并提出了众多改进方法。与此同时,随着 MBP 概念在水声信号处理中的进一步深化,匹配模处理(Matched-Mode Processing, MMP)以及模基匹配滤波处理(Model-Based Matched Filtering, MBMF)等技术也相继出现并成为广大

学者的研究热点。其中典型的代表就是著名学者 Candy, 其将 MBP 方法广泛地应用到水下声呐被动定位, 海洋环境参数反演, 水下目标检测、估计、识别等领域, 取得了重要的成果。

在水声信号处理研究中, 水下目标方位估计一直以来是广大学者们研究的热点问题。一方面, 由于浅海多途效应的影响, 声场水平纵向相关性明显下降, 阵列增益大大低于理想的阵增益。另一方面, 传统基于平面波模型的方位估计方法在多途条件下均存在一定的估计偏差, 特别是应用于长线阵时, 容易出现空间谱峰偏离或分裂现象, 严重影响传统方位估计方法在实际浅海环境中的应用。人们对此开展了大量研究, 期望利用水声物理规律及可预测的声场信息来改善这一现象。1987 年, Cox 等人提出大尺度阵列匹配场处理的子阵方法, 在此基础上, Morgan 等人研究了相干特性对大尺度阵的匹配场波束形成的影响, 并且指出了相干特性对于各种不同的阵列处理器的影响程度。2009 年, 舒象兰等人利用简正波理论模型分析了浅海条件下声信号传播的多途效应, 并从理论上推导了浅海声传播的多途效应对传统的基于平面波假设的目标方位估计方法的影响, 指出浅海声传播的多途效应会导致传统的基于平面波假设的目标方位估计方法产生方位估计偏差, 在有些情况下甚至会产生主瓣的分裂。

由此可见, 解决浅海方位估计问题的根本方法是将水下声传播模型融入到目标方位估计之中, 从这一角度出发, 浅海方位估计问题属于 MBP 研究的一个重要范畴。按照实际所结合的声传播模型来划分, 浅海目标方位估计方法大体上可以分为两类: 基于声传播射线模型的浅海目标方位估计方法以及基于声传播简正波模型的浅海目标方位估计方法。

著名学者 Naidu 一直致力于结合浅海声传播的射线模型进行水下目标方位估计方面的研究。20 世纪 90 年代初, 该学者利用垂直线列阵, 结合 Schmidt 信号子空间方法构造出了尖锐的空间谱峰。其后, 进一步考虑海底沉积层声学特性对方位估计稳健性的影响, 提出了稳健的 MISA (Multi Image Subspace Algorithm) 方法, 并对该方法的性能进行了详细的讨论, 证明了该方法是无偏和统计有效的。随后, 进一步将该算法推广至浅海环境下宽带目标方位估计中, 取得了较好的效果。同时, Naidu 还积极借鉴传统空间谱估计方法的改进思想, 将高阶累计量等方法引进浅海目标方位估计中, 有效地抑制了空间色噪声对算法性能的影响。

在结合简正波模型进行水下目标方位估计研究方面, 广大学者也开展了大量的研究, 取得了丰硕的成果。20 世纪 90 年代初, 宫先仪等人利用浅海水声环境中传播波的简正波特性, 将平面波波束形成的概念加以推广构成模波束形成, 实现声源定位 (深度和距离) 及改善二维搜索条件下的信号检测能力, 同时还讨论并研究了实际环境条件下可能出现的模型失配及其对模波束形成的影响, 以及相应的稳健处理问题。随后, 该研究团队又以统一的时空处理与声场条件相匹配的观点, 研究了具有一定角扩展的广义指向性信号、多路径信号、波导中的简正波和理想条件下的平面波信号等典型的基于传播模型的阵列信号处理方法, 以及克服扰动影响的稳健处理方法。

从理论上来说, 水下目标方位估计是传统空间谱估计由平面波模型向水下声传播模型的推广, 因此传统空间谱估计的拓展成为重要的研究方向。

2004 年, Lakshminpathi 等人借鉴传统空间谱估计中信号子空间和噪声子空间正交的思想, 提出了子空间相交方法 (SI), 用于浅海多途环境中的目标方向估计, 该方法在已知各号简正波波数的情况下, 只需要对方位进行一维搜索, 大大减小了计算量。随后, 张爱民等人针对 SI 方法需要求解一个奇异矩阵的 QR 分解, 数值稳定性较差的缺点, 从子空间相交方

法的基本原理及线性组合的角度出发,提出了约束最小二乘子空间相交方法和总体最小二乘子空间相交方法。万瑾等人深入分析海洋多途效应对子空间相交方法的影响,建立了基于全局优化的子空间相交方位估计方法(GOSI)模型,给出了基于粒子群优化方法的算法。宋俊等人提出了一种基于简正波模式子空间的匹配测向的新方法,该方法对于改进浅海多途环境中长线阵的低频探测性能有明显效果。此外,黄建国等人将传统空间谱估计中的最大似然估计法和 MUSIC 算法与浅海简正波模型相结合,把观测点处的声压看成是若干阶简正波的叠加,构造出了均匀线列阵的接收信号的矩阵方程形式,对水下目标进行准确的方位估计。

基于 MBP 的思想,将传统空间谱估计方法与水声信号传播模型相结合,可有效地解决海洋中多途效应引起的方位估计偏差及空间谱峰分裂问题,改善方位估计方法对水声环境模型的适应性,提高传统空间谱估计方法对信道环境的稳健性。

1.3 本书结构和内容

本书共7章,体系结构如图1-3-1所示。

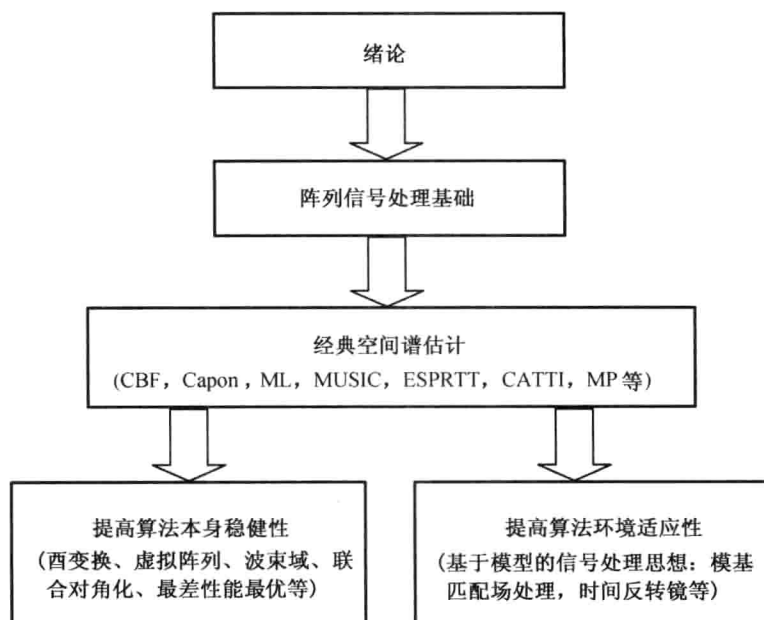


图1-3-1 本书的体系结构

第1章 介绍空间谱估计稳健性问题并概述其发展过程及研究现状,给出本书体系和各章内容。

第2章 介绍阵列信号处理的基础,具体包括阵列信号模型、常规波束形成及统计最优波束形成。

第3章 介绍空间谱估计基础理论与方法。首先,阐述经典的空间谱估计方法,如 Bartlett 波束形成器、最小方差无畸变波束形成器、最大似然估计法、子空间分解类方法(MUSIC, ESPRIT)等;其次,从改善算法结构本身对噪声、干扰等因素的抑制能力方面出发,

着重讨论了虚拟阵列、酉变换等在空间谱估计上的应用。

第4章 介绍联合对角化技术在方位估计中的应用。利用二阶及高阶统计量联合对角形式,对空间谱的形式进行修正,从而提高高分辨率方位估计方法的稳健性。

第5章 介绍稳健自适应波束形成方法。首先,阐述自适应波束形成稳健性问题,分析导向矢量失配对自适应波束形成器性能的影响;其次,介绍经典的稳健自适应波束形成方法;最后,详细论述基于二阶锥规划理论的稳健自适应波束形成方法。

第6章 介绍基于模型的阵列处理技术。首先,介绍基于模型的信号处理方法(MBP)的基本概念和思想;其次,以浅海波导中目标的方位估计为典型应用,讨论基于模型数据匹配的相干信息处理方法,包括模基匹配滤波、时间反转镜等技术。

第7章 介绍浅海目标稳健方位估计方法。首先,介绍水下声信道的相干多途特性,并阐述多途效应对方位估计的影响;其次,基于MBP处理思想,分别结合射线理论和简正波理论,讨论浅海目标稳健方位估计方法及其性能。

第 2 章 阵列信号处理基础

2.1 引言

随着国民经济和国防科学技术的发展,阵列信号处理技术得到了迅猛发展,引起了各国的高度重视,作为现代信号处理领域的一个重要分支,其主要目的是对阵列接收信号进行处理,增强期望信号,抑制干扰和噪声,并提取如信号到达方向等与信号源属性有关的信息。与传统的单传感器相比较,阵列信号处理具有波束指向性控制灵活、空间分辨能力较高等优点,广泛应用于雷达、声呐、通信、勘探、医学工程等众多军事及国民经济领域。然而,尽管阵列信号处理技术的发展与突破日新月异,但其基本概念、原理及方法对于广大学者,特别是初学者来说,仍然至关重要。

基于此,本章主要介绍与阵列信号处理技术相关的一些基本概念,如阵列系统、阵列信号模型、传统波束形成器、统计最优波束形成器等,从而为后续章节的学习奠定基础。

2.2 阵列系统

考虑一个阵列系统,如图 2-2-1 所示,假设该阵列系统由 M 个阵元组成,每一个阵元的输出信号乘以相应复加权系数的复共轭,然后累加求和得到阵列的输出,则阵列系统的输出可表示为

$$y(t) = \sum_{m=1}^M w_m^* x_m(t) \quad (2-2-1)$$

其中, $*$ 表示复共轭。

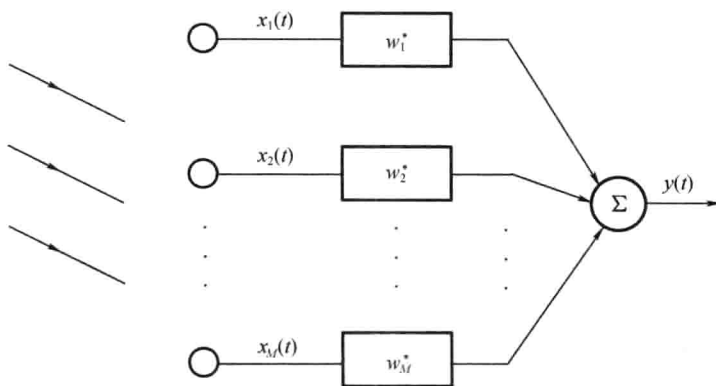


图 2-2-1 阵列系统结构示意图

将阵列各通道的复加权系数表示为矢量形式:

$$\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_M]^T \quad (2-2-2)$$

将阵列各通道的接收信号表示为矢量形式:

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T \quad (2-2-3)$$

综合表达式(2-2-1)、式(2-2-2)、式(2-2-3),则阵列系统的输出可表示成矩阵形式:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{X}(t) \quad (2-2-4)$$

其中,上标 T 和 H 分别代表一个矢量或矩阵的转置和复共轭转置, \mathbf{w} 和 $\mathbf{X}(t)$ 分别表示权矢量和信号矢量。

阵列的输出功率定义为输出信号幅度的平方,即

$$P(t) = |y(t)|^2 = y(t)y^*(t) \quad (2-2-5)$$

将式(2-2-4)代入式(2-2-5),则基阵输出功率可进一步表示为矩阵形式:

$$P(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{X}(t) \mathbf{X}^H(t) \mathbf{w} \quad (2-2-6)$$

若接收信号 $\mathbf{x}(t)$ 为零均值平稳随机过程,则基阵的平均输出功率为

$$P_{mean} = E[\mathbf{w}^H \mathbf{X}(t) \mathbf{X}^H(t) \mathbf{w}] = \mathbf{w}^H E[\mathbf{X}(t) \mathbf{X}^H(t)] \mathbf{w} = \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} \quad (2-2-7)$$

其中, $E[\cdot]$ 表示数学期望, \mathbf{R} 为阵列的相关矩阵:

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{X}(t) \mathbf{X}^H(t)] \quad (2-2-8)$$

相关矩阵 \mathbf{R} 中的元素代表各个阵元接收信号之间的相关。例如, \mathbf{R}_{ij} 表示阵列第 i 个阵元接收信号和第 j 个阵元接收信号之间的相关。

考虑空间中同时存在期望信号、干扰信号及随机噪声的情况,其中随机噪声包括背景环境噪声和接收机电子噪声。令 $\mathbf{x}_s(t)$, $\mathbf{x}_i(t)$ 和 $\mathbf{n}(t)$ 分别代表阵列接收信号中的期望信号矢量、干扰信号矢量和噪声矢量,则阵列接收信号可以表示为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{n}(t) \quad (2-2-9)$$

令 $\mathbf{y}_s(t)$, $\mathbf{y}_i(t)$ 和 $\mathbf{y}_n(t)$ 分别代表阵列接收信号中的期望信号矢量、干扰信号矢量和噪声矢量的阵列输出,即

$$\mathbf{y}_s(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}_s(t) \quad (2-2-10)$$

$$\mathbf{y}_i(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}_i(t) \quad (2-2-11)$$

$$\mathbf{y}_n(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{n}(t) \quad (2-2-12)$$

定义期望信号相关矩阵 \mathbf{R}_s 、干扰信号矩阵 \mathbf{R}_i 、噪声信号矩阵 \mathbf{R}_n 分别为

$$\mathbf{R}_s = E[\mathbf{x}_s(t) \mathbf{x}_s^H(t)] \quad (2-2-13)$$

$$\mathbf{R}_i = E[\mathbf{x}_i(t) \mathbf{x}_i^H(t)] \quad (2-2-14)$$

$$\mathbf{R}_n = E[\mathbf{n}(t) \mathbf{n}^H(t)] \quad (2-2-15)$$

综合式(2-2-8)至(2-2-15)可得

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_s + \mathbf{R}_i + \mathbf{R}_n \quad (2-2-16)$$

令 P_s , P_i 和 P_n 分别代表期望信号、干扰信号和噪声的平均输出功率,则

$$P_s = E[\mathbf{w}^H \mathbf{x}_s(t) \mathbf{x}_s^H(t) \mathbf{w}] = \mathbf{w}^H E[\mathbf{x}_s(t) \mathbf{x}_s^H(t)] \mathbf{w} = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_s \mathbf{w} \quad (2-2-17)$$

$$P_i = E[\mathbf{w}^H \mathbf{x}_i(t) \mathbf{x}_i^H(t) \mathbf{w}] = \mathbf{w}^H E[\mathbf{x}_i(t) \mathbf{x}_i^H(t)] \mathbf{w} = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_i \mathbf{w} \quad (2-2-18)$$

$$P_n = E[\mathbf{w}^H \mathbf{n}(t) \mathbf{n}^H(t) \mathbf{w}] = \mathbf{w}^H E[\mathbf{n}(t) \mathbf{n}^H(t)] \mathbf{w} = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_n \mathbf{w} \quad (2-2-19)$$

令 P_N 代表干扰信号和噪声的总平均输出功率,即

$$P_N = P_i + P_n \quad (2-2-20)$$

将式(2-2-18)和式(2-2-19)代入式(2-2-20),可得