

专著 西北工业大学  
出版基金 资助项目  
ZIZHU XIANGMU

ZHUANZHU

# 水声阵列信号的匹配场处理

杨坤德 著

ZHUANZHU

西北工业大学出版社

西北工业大学专著出版基金资助项目

# 水声阵列信号的匹配场处理

杨坤德 著

西北工业大学出版社

**【内容简介】** 本书深入系统地介绍了水声阵列信号匹配场处理的理论和方法。全书主要内容有:水声环境参数反演的总体框架,浅海环境参数宽带匹配场反演,浅海声速剖面的反演方法,匹配场定位的基本原理和稳健方法,匹配场噪声抑制的原理和稳健方法等。本书内容新颖,体现了近年来国内外尤其是作者所在的课题组在该专业领域的有关研究成果,突出了需要解决的实际问题,可供从事水声工程、海洋工程、声纳技术等领域的科技人员和高等院校师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

水声阵列信号的匹配场处理/杨坤德著. —西安:西北工业大学出版社,2008.2

ISBN 978-7-5612-2351-2

I. 水… II. 杨… III. 水声信号—信号处理 IV. TB56  
TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 019422 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029) 88493844 88491757

网 址:www.nwpu.com

印 刷 者:陕西向阳印务有限公司

开 本:850 mm×1 168 mm 1/32

印 张:8.75

字 数:212 千字 插页:1

版 次:2008 年 2 月第 1 版 2008 年 2 月第 1 次印刷

定 价:30.00 元(平装) 48.00 元(精装)



杨坤德 1974年生，分别于1996年、1999年、2003年获西北工业大学学士、硕士和博士学位，现为西北工业大学航海学院副教授，硕士生导师。2006—2007年在加拿大维多利亚大学从事访问学者研究。主持国家自然科学基金2项，其他科研项目7项，并参与8项国家及省部级科研项目；已发表论文40余篇，被SCI、EI等检索20余篇次；已授权专利3项；参编教材2部；获各种科技奖励4项。现为IEEE会员，中国声学学会青年工作委员会委员，中国海洋学会海洋物理分会委员。主要研究领域为水声物理、声纳技术、水声信号处理、海上电磁传播等。

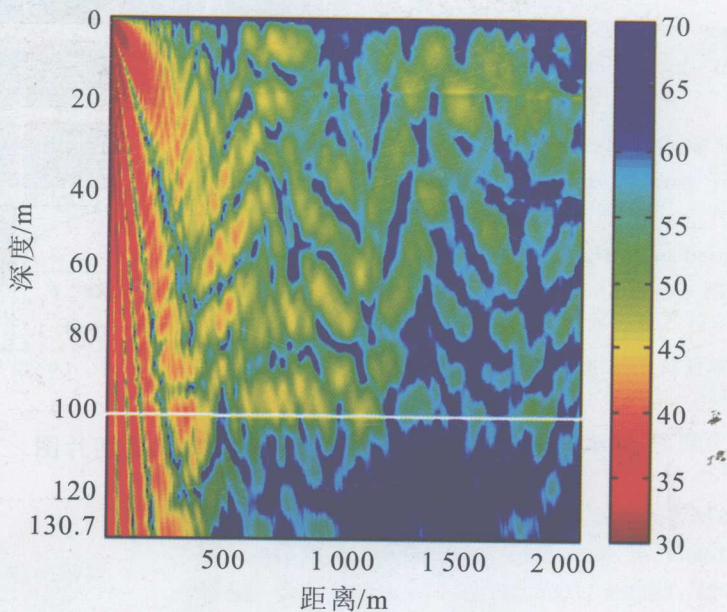
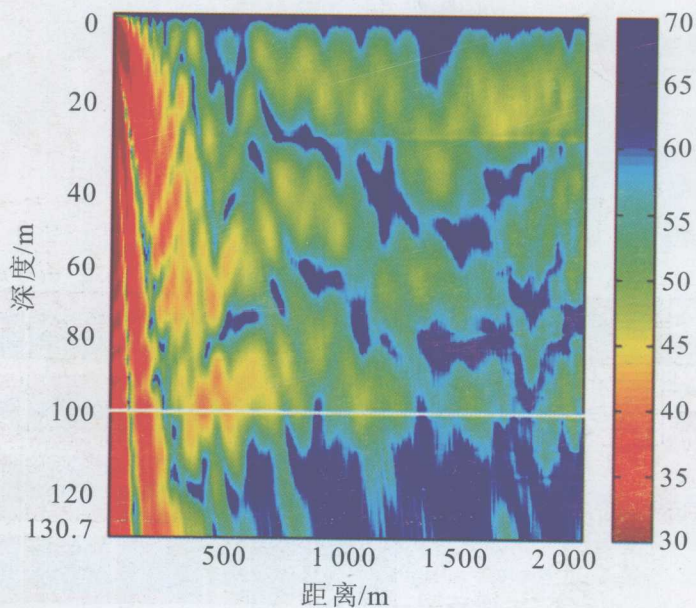


图 2.4.6 SDC 环境下的声传播

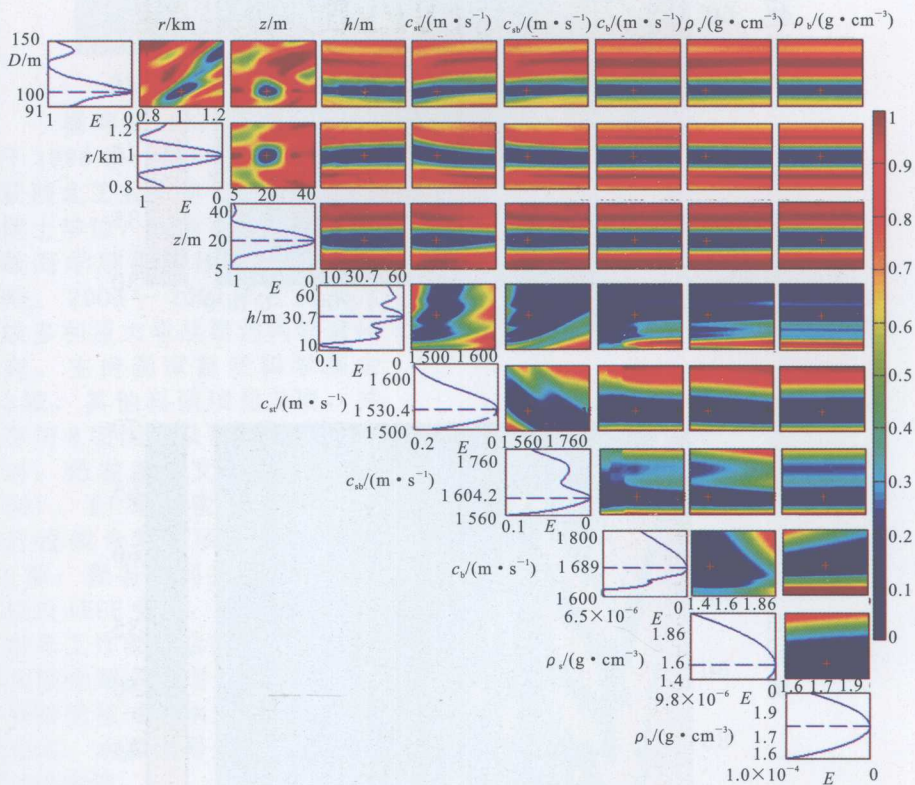


图 2.4.7 SDC 环境下目标函数的 1D 与 2D 切片图

# 前 言

水声阵列信号匹配场处理的基本含义是充分利用声波在海洋信道中传播的特点,将由声场数值模型计算得到的阵列拷贝场向量与测量数据进行“匹配”,从而进行水下目标被动定位和水声环境参数反演。自 20 世纪 70 年代提出匹配场处理的概念以来,国内外研究者围绕匹配场定位和匹配场反演,开展了大量卓有成效的理论研究和实验工作,建立了独立的理论体系和独具特色的研究方法,在工程应用方面也得到了成功的实践。

本书试图以比较简明的方式,向读者介绍匹配场处理的基本理论及一些具有实际应用价值的研究成果。其内容以作者所在的课题组多年的科研积累为主,所收集的素材主要来自课题组在国内外期刊上发表的论文,同时广泛参考了国内外取得的代表性成果。本书所阐述的研究成果,得到了 4 项国家自然科学基金(10774119, 10304015, 60472073, 69672018)、“973 计划”海洋环境信息获取项目、陕西省自然科学基金基础研究计划(2005F40)等项目的资助。

本书共分 6 章。第 1 章概述了匹配场定位、匹配场反演和匹配场噪声抑制的研究背景。第 2 章概括总结了匹配场反演问题的总体框架,对水声环境参数反演的重要环节进行了详细的阐述。第 3 章对国内外广泛研究的宽带匹配场处理问题进行了深入的研究,并给出了中国东海海底参数反演的实例。第 4 章阐述了浅海声速剖面的经验正交函数表示问题,并研究了两种反演声速剖面的稳健方

法。第 5 章研究了匹配场定位的基本原理,并阐述了作者研究的匹配场定位稳健方法。第 6 章详细介绍了作者所在的课题组近年来提出的匹配场噪声抑制的原理和稳健方法。

这里,要特别感谢作者的博士生导师马远良院士,感谢他最初引导我进入水声工程科学领域并在他的指导下完成了关于匹配场处理的学位论文。从 1999 年认识马老师至今,他一直在我的成长道路上给予亲切关怀和大力支持,倾注了大量的心血,提供了很多的机会,使我从一个知识浅薄的大学生,逐渐锻炼成长为具有一定科研能力的青年骨干教师。从 1995 年起,马老师就带领博士生开始进行匹配场处理的研究,并首次采用 3 米的垂直短阵,实现了湖上目标的远距离定位。本书中关于匹配场反演、匹配场噪声抑制的若干新方法,都是在马老师的辛勤指导下完成的。感谢曾经在课题组研究学习的孙枕戈博士、沈远海博士、张忠兵博士、邹士新博士、鄢社锋博士和雷波博士,他们在匹配场反演、匹配场定位和匹配场噪声抑制的研究结果是本书部分章节的基础。同时还要感谢加拿大维多利亚大学的匹配场反演科学家 Ross Chapman 教授,在加拿大留学期间他为我提供了良好的工作环境和学术交流机会。另外,还要感谢我的夫人赵亚梅女士,在本书的撰写和日常工作中,始终给予我极大的鼓励和无私的奉献,是她的大力支持使本书得以顺利出版。

希望本书的出版将对从事海洋科学、水声工程、声纳技术等领域的科研工作者有所帮助。

由于作者学识水平所限,书中难免存在不妥之处,恳请读者和相关专业同仁提出宝贵的意见和建议。

作者  
2007 年 9 月



# 目 录

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 匹配场处理的含义 .....	1
1.2 水声环境参数的匹配场反演 .....	2
1.3 水下目标的匹配场被动定位 .....	5
1.4 匹配场噪声抑制 .....	8
参考文献.....	9
<b>第 2 章 水声环境参数反演的总体框架</b> .....	16
2.1 引言.....	16
2.2 水声环境参数反演的目标函数.....	18
2.2.1 匹配物理量及目标函数的建立.....	18
2.2.2 浅海环境参数模型的建立.....	26
2.2.3 反演参数的上下边界.....	28
2.2.4 反演参数的敏感性分析.....	28
2.3 拷贝场计算的基本模型 .....	30
2.3.1 声传播的基本模型.....	30
2.3.2 常用模型计算程序的性能比较.....	31
2.4 参数反演的全局寻优算法.....	32
2.4.1 用差异进化算法进行海洋环境参数反演.....	33

2.4.2	差异进化算法的性能仿真·····	36
2.4.3	基于差异进化算法的混合优化算法·····	39
2.4.4	混合优化算法在匹配场反演中的性能分析 ·····	45
2.5	参数反演结果的不确定性分析·····	50
2.5.1	参数反演不确定性分析的研究现状·····	51
2.5.2	逆问题的贝叶斯积分·····	53
2.5.3	邻域近似算法的基本原理·····	55
2.5.4	估计 PPD 的邻域算法结构及仿真结果 ·····	58
2.5.5	实验数据验证·····	66
2.6	本章小结·····	70
	参考文献 ·····	71
<b>第 3 章</b>	<b>浅海环境参数宽带匹配场反演</b> ·····	<b>77</b>
3.1	引言·····	77
3.2	宽带匹配场反演的最大似然目标函数分析·····	78
3.2.1	宽带数据假设·····	78
3.2.2	观察数据具有幅度和相位信息时的目标函数 ·····	79
3.2.3	观察数据只有幅度信息时的目标函数·····	83
3.3	相干与非相干宽带匹配场处理·····	87
3.3.1	数据模型与 Bartlett 处理器 ·····	87
3.3.2	宽带非相干 Bartlett 处理器 ·····	90
3.3.3	宽带相干处理器·····	90
3.3.4	Westwood 宽带匹配场处理器 ·····	93

3.4	宽带匹配场反演的多步优化方法	95
3.4.1	反演模型参数的敏感性指数	96
3.4.2	多步匹配场反演方法	100
3.5	宽带匹配场反演的实例	102
3.5.1	实验条件	103
3.5.2	水平不变的宽带匹配场反演	105
3.5.3	水平变化的宽带匹配场反演	112
3.5.4	参数反演结果的比较分析	115
3.6	浅海环境参数反演的误差来源分析	116
3.7	本章小结	117
	参考文献	117
<b>第4章</b>	<b>浅海声速剖面的反演方法</b>	<b>122</b>
4.1	引言	122
4.2	浅海声速剖面的经验正交函数表示	123
4.2.1	用 EOF 表示声速剖面的原理	124
4.2.2	中国东海声速剖面的 EOF 表示	125
4.3	沉积层对多途到达结构的影响	130
4.3.1	沉积层分类	132
4.3.2	仿真条件	133
4.3.3	多途到达的简正波模型仿真方法	134
4.3.4	多途到达的声线仿真方法	139
4.3.5	多途到达仿真结果的比较	143
4.4	浅海声速剖面的声线到达时差反演方法	145
4.4.1	到达时差反演方法的原理	145

4.4.2	到达时差反演的实验数据分析 .....	147
4.5	浅海声速剖面的匹配波束反演 .....	152
4.5.1	匹配波束反演的原理 .....	153
4.5.2	匹配波束反演的实验数据验证 .....	155
4.6	本章小结 .....	160
	参考文献 .....	161
<b>第5章</b>	<b>匹配场定位的基本原理和稳健方法 .....</b>	<b>165</b>
5.1	线性匹配场处理器的原理 .....	166
5.2	全阶自适应匹配场处理器 .....	167
5.2.1	自适应匹配场处理器的原理 .....	167
5.2.2	非相干噪声条件下的匹配场处理阵增益 ...	169
5.2.3	非相关多源干扰噪声条件下的匹配场处理阵增益 .....	171
5.2.4	匹配场处理对失配误差的敏感性 .....	174
5.3	自适应降阶匹配场算法 .....	177
5.3.1	自适应降阶匹配场算法的通用结构 .....	178
5.3.2	基于特征向量的降阶自适应匹配场处理算法 .....	179
5.3.3	基于模式分解的降阶自适应匹配场处理算法 .....	182
5.4	环境参数失配条件下的稳健自适应匹配场定位算法 .....	184
5.4.1	邻域位置约束的匹配场定位算法 .....	184
5.4.2	环境扰动约束的匹配场定位算法 .....	185

---

5.5	运动目标自适应匹配场定位的运动补偿算法	186
5.5.1	运动点源的声场模型	187
5.5.2	运动补偿算法	189
5.5.3	强干扰背景下的子空间运动补偿算法	190
5.6	不确定环境下的稳健自适应匹配场处理	192
5.6.1	环境失配及存在水面强干扰时的 AMFP 方案	193
5.6.2	性能仿真	194
5.6.3	实验数据验证	197
5.7	基于扇区特征向量约束的稳健自适应匹配场处理器	201
5.7.1	扇区聚焦约束自适应匹配场处理器	203
5.7.2	扇区特征向量约束自适应匹配场处理器	203
5.7.3	MV-SEC 的特点	205
5.7.4	性能仿真	206
5.7.5	实验数据验证	212
5.8	基于环境扰动的线性匹配场处理方法	217
5.8.1	环境扰动线性匹配场的原理	218
5.8.2	线性匹配场干扰抑制算法	220
5.8.3	性能仿真	223
5.8.4	实验数据验证	229
5.9	本章小结	232
	参考文献	232

<b>第 6 章 匹配场噪声抑制的原理和稳健方法</b> .....	237
6.1 匹配场噪声抑制的研究历程 .....	237
6.2 匹配场噪声抑制的原理与稳健方法 .....	240
6.2.1 匹配场噪声抑制的基本原理 .....	240
6.2.2 多约束匹配场噪声抑制的理论解 .....	241
6.2.3 匹配场波束形成后噪声抑制方法 .....	244
6.2.4 性能仿真 .....	245
6.3 MFPIC 用于同方向强干扰背景下的目标检测 .....	249
6.4 匹配场噪声抑制的矩阵滤波方法 .....	251
6.4.1 矩阵滤波方法的原理 .....	251
6.4.2 稳健的空域矩阵滤波方法 .....	253
6.5 基于矩阵滤波的拖线阵匹配场噪声抑制方法 .....	262
6.5.1 拖船噪声抑制的矩阵滤波方法 .....	262
6.5.2 数值仿真实验及结果 .....	264
6.6 本章小结 .....	268
参考文献 .....	269

# 第 1 章 概 述

本章首先介绍了匹配场处理的基本含义,其次对匹配场反演、匹配场定位和匹配场噪声抑制的研究背景进行了阐述。

## 1.1 匹配场处理的含义

匹配场处理(MFP: Matched Field Processing)<sup>[1]</sup>的含义是:利用海洋环境参数和声传播信道特性,通过水下声场模型计算得到接收基阵的声场幅度和相位,形成拷贝场向量,并与基阵接收数据进行“匹配”,从而实现水下目标的被动定位和海洋环境参数的精确估计。

声源、海洋信道与水听器阵是水声学研究中的三个基本要素。声源在水中辐射声信号,是形成声场的源头;海洋信道则决定了声波在海洋中的传播特点;水听器阵用以接收声信号,对水中的声场分布进行采样。这三者之间相互密切联系,构成不可分割的统一整体。已知其中两者,就可以推断第三者,这就是水声匹配场处理的基本依据。如果已知水听器阵接收信号和海洋信道信息,待求解的是包括声源位置在内的声源信息,这就是匹配场被动定位。如果已知的是水听器阵接收信号和包括声源位置在内的声源信息,待求解的是海洋信道信息,这就是匹配场反演(MFI: Matched Field Inversion)。它们都是水声匹配场处理研究的重要内容。

匹配场处理技术近年来在水下目标检测、被动定位、海洋环境参数反演等方面的应用受到广泛的关注。在过去的近 20 年里,国内外许多专家学者进行了这方面的研究,并表现出了极大的兴趣。

匹配场处理技术自 20 世纪 90 年代中期以来,一直是国际上水声学领域的研究热点之一。

匹配场处理技术得益于信号处理技术与水声物理学的交叉。它在处理接收到的水声信号时,最大限度地利用了水声信道模型、基阵设计以及窄带和宽带相关处理技术,因而与传统的淡化信道的信号处理技术相比,具有鲜明的特色。正是因为匹配场处理技术的性能优势,并且在实际中有重要而广泛的应用前景,因而得到了国内外学者的高度重视与深入研究。至今,从匹配场被动定位和匹配场反演的原理、方法、性能分析,到实验设计、数据分析等诸多方面都有大量的成果面世。匹配场处理技术(匹配场反演和匹配场被动定位)已进入全面繁荣发展的新阶段,部分匹配场处理方法已经在工程实际中发挥着重要的作用。

## 1.2 水声环境参数的匹配场反演

浅海环境参数尤其是底质声学参数(通常也称为地声参数)的直接测量不仅费时、昂贵,而且很难大面积实施,匹配场反演是快速低成本获取局部海域环境参数信息的有效方法。

人们最先对海洋声速剖面的反演进行了大量的研究。利用声场确定海洋声速,首先是由 Munk 和 Wunsch 提出的<sup>[2]</sup>。他们考察了水声信号到达时间与传播路径声速分布的关系。Tolstoy 等人<sup>[3-4]</sup>提出了一个对海洋进行声层析的匹配场反演方案,他们利用模拟数据,考虑全三维海洋变化性,设计了一种海洋声层析的方法,即沿感兴趣的海洋周围从飞机上投放爆炸物(低频宽带声源),用傅里叶分量与波动方程的解相匹配进行反演。

MFI 算法最早的实验之一是 Ingenito 报告<sup>[5]</sup>的模式分离实验,他在浅海中使用垂直阵对简正波模式进行分离和识别,同时利用模式衰减与海底沉积层衰减特性相联系的理论,通过简单的数



据拟合确定了海底吸收系数。

在深海,反演经常是通过多径传播到达时间的不同来进行,而在浅海,由于声信号与海水边界作用,使得传播变得十分复杂,通过多径到达结构来进行反演已不太合适。比较可行的方法是通过阵列获取声信号在时域、频域、空域的幅度和相位信息,并通过有效的寻优过程,得到与接收数据相匹配的环境信息。因此,很多研究者将目光投向了宽带匹配场处理研究。

20 世纪 80 年代后期,出现了若干种宽带匹配场被动定位的处理方法和一些实验结果。Baggeroer<sup>[6-7]</sup>发现对多个单频匹配场处理结果进行非相干的平均可以减少定位的模糊度。Westwood<sup>[8]</sup>研究了不同的宽带处理方法,建立了各种在频域、空域相干与非相干的匹配场处理目标函数,并比较了定位性能。Brienzo 和 Hodgkiss<sup>[9]</sup>利用宽带方法成功地进行了爆炸声源的定位。Yang<sup>[10]</sup>研究了在时频域的相干与非相干匹配模式处理方法。

在被动定位研究的基础上,宽带匹配场反演日益受到人们的重视,各种研究成果和实验结果不断涌现。Rubano<sup>[11]</sup>利用不同位置的爆炸声源测量了群速度分布、模式形状和传播损失,并通过匹配方法得到了三层海底地声模型的参数。Zhou<sup>[12]</sup>采用与 Rubano 类似的实验情况,通过群速度分布特性和简正波测量结果(80~800Hz)得到了远黄海局部海域的地声参数。Rajan, Lynch 和 Frisk<sup>[13-14]</sup>采用群速度分布曲线来反演海底地声属性,并采用线性扰动反演技术比较了窄带和宽带(20~120Hz)反演结果。Gerstoft<sup>[15]</sup>采用多频数据和线性匹配场处理器对意大利 Elba 岛北部海域环境参数进行了反演。Hermant<sup>[16]</sup>进行了地中海西部海域的宽带匹配场反演,利用同时发射的 7 个单频信号(200~800Hz),对水平变化的浅海环境进行了反演,得到了十分稳健的结果,与底质测量基本一致。Potty 和 Miller<sup>[17]</sup>利用不同频率、不同模式的到达时间,对新英格兰跨大陆架海域进行了水平不变和