

水声信号处理中匹配场处理技术研究的 现状和展望*

王 静¹, 黄建国¹, 管 静²

(1. 西北工业大学航海学院, 西安 710072; 2. 中船总750试验场, 昆明 650051)

摘要: 本文首先给出了匹配场处理的基本概念及其研究内容, 进而对该技术的理论框架、各种处理方法和分析方法以及实际试验结果做了系统的归纳和简单的评述。在此基础上, 总结出了该领域当今的研究热点和进一步的研究方向。

关键词: 匹配场处理; 综述; 声传播模型

中国分类号: 0427 文献标识码: A

An survey of matched-field processing in acoustical signal processing

WANG Jing¹, HUANG Jia-*ng*uo¹, GUAN Jing²

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University,
Xi'an 710072; 2. CSSC750, Kunming, 650032)

Abstract: This paper begins with the basic idea of MEP and what it mainly deals with. Then it gives an outline of the theory framework, processing methods and some important experience results. Based on the above, the research emphases today and for the future are pointed out.

Key words: matched-field; survey; propagation model

1 引 言

海洋环境是一个包括海面、海底和海水介质的复杂多变的环境, 作为探测手段的传感器和作为探测目标的声源就处在这样的环境中。声源、环境(或称信道)和接收阵三者互相联系, 构成一个整体。传统的水声信号处理假设声波为平面波, 声场为各向同性, 在

此基础上发展了丰富的信号和阵列处理方法。但是, 随着理论研究和实际应用的不断深入, 人们认识到这种假设对声波在波导中的传播是不合适的, 尤其是在低频的时候, 因此, 80年代以来, 水声信号处理领域的主要进展就是将传播介质的物理特性与传统的信号处理算法相结合, 由此产生了匹配场处理技术。该技术成功地解决了很多实际问题, 并

* 九五国防重点预研项目

收稿日期: 99-05-24; 修订日期: 99-09-17

作者简介: 王静(1970-), 女, 博士研究生

呈现出极大的发展潜力。

在声源、信道和接收阵三者之中，如果已知两者，就可以根据接收阵的实际测量声场（已受信道影响）与接收阵处的理论预测声场（信道影响由模型模拟）的匹配性对第三者进行参数估计，这就是所谓的匹配场处理（matched-field processing, 简称 MFP）^[1]。

MFP 现在的研究内容主要集中在两个方面，第一，声源远程和超远程被动定位^[2]。随着导弹和火箭助推技术的飞速发展，武器的有效作用半径大大增加，而传统的被动测距方法探测距离有限，而且都不能确定目标的深度，从而无法对水下目标，尤其是潜艇实施有效的攻击，而 MFP 方法突破了传统测距方法的极限，同时还能正确估计声源的深度；第二，海洋环境参数反演^[3]。由于水声信号处理越来越多地结合了声传播模型，能否得到准确的海洋环境参数往往成为最终能否解决问题的关键，从而引起研究人员越来越多的关注。在已知声源参数和接收信号的前提下，利用 MFP 技术对海洋环境进行反演，可以确定海洋地形和地理声学等多种参数的值，推算出海洋环境的各种性质，在此基础上建立全球海洋监测系统，服务于军事以及开发利用海洋资源的目的。

MFP 的思想由来已久，之所以直到近十几年才引起水声界的普遍关注，主要是由于一些相关理论和技术取得了突破性进展；波导模型的研究取得了很好的结果；低频水声传播的相干性为试验所证实；精确阵列形状校准和测量可以实现；计算机的计算能力飞速提高等等。

2 传播模型

MFP 中预测声场是由声传播模型在各种环境参数已知的条件下求解得到的，MFP 的性能在很大程度上依赖所选择的传播模型的正确性和精确性。

所有传播模型的理论基础都是波动方程，我们根据实际情况赋予波动方程不同的边界条件和波导性质，然后求解，就得到各种不同的传播模型（表1）。

以上介绍的是最基本的传播模型，根据不同的使用环境，人们又对这些模型做了各种修正和调整，使它们能处理各种不同的边界条件和波导性质，其中考虑较多的就是模型参数与距离无关或与距离有关时的区别。

表1 声传播模型及主要性质

模型	表达式	适用条件	优点	缺点
射线理论 (Ray Theory) ^[4]	$\Omega_0 F(x, y, z) e^{G(x, y, z)}$	高频: 近场, 距离小于几倍水深	简单, 直观	不适用于远场
简正波模型 (Normal Mode-NM) ^[5]	$\Omega_0 F(z) G(r)$ 为格林函数, $G(r)$ 为汉克尔函数	低频: 远场, 距离大于几倍水深	相对于射线理论, 计算简单, 可以方便地计算整个声场	要求精确的海底沉积层等的物理参数; 不容易考虑信道参数与距离有关的情况
多途展开模型 (Multipath Extension-WKB) ^[6]	$\Omega_0 A(z) e^{SRz}$	高频: 深水; 声速随深度的变化不大	算法简单	不容易考虑信道参数与距离有关的情况
快速声场模型 (Fast field-FFP) ^[4]	将 NM 中的汉克尔函数用渐近展开式的第一项来代替	近场	可采用 FFT 加快运算速度; 可以方便地估计脉冲声源	只限于与距离无关的环境
抛物方程模型 (Parabolic Equation-PE) ^[7]	用抛物方程来近似波动方程, $\Omega_0 F(y, z) G(y) F(r, z)$ 为抛物方程, $G(r)$ 为汉克尔函数	低频: 远场	适用于信道参数与距离有关的情况	相位误差随距离增大而累积

3 MFP 处理器

如上所说，所谓 MFP，就是将测量场与预测场进行相关匹配处理，从而找到与测量场最接近的预测场，并认为这个预测场就是测量场的估计值。我们把完成这个匹配处理的算法或技术称为 MFP 处理器^[2]。实际上，MFP 是平面波理论中波束形成概念的推广，很多阵列处理方法及其变形都可用于 MFP，其中的很多方法被证明是很有效的（表2）。

在表2中介绍的 MFP 处理器中，线性处

理器、MV 和 MMP 是使用最多的, 很多研究者还针对这几种处理器提出了相应的快速算法。

4 失配及稳定性问题

MFP 中的失配问题主要研究整个处理过程中各种不确定性对 MFP 估计结果的影响, 研究该问题可以使我们明确哪些参数必须精确测量以及精确到何种程度。

表2 匹配处理器及性能

处理器	定义	优点	缺点
线性处理器 (也称 Bartlett 或常规处理器) ^[8]	直接对测量数据与预测数据取相关	宽容性, 即对模型参数误差或扰动不敏感	存在旁瓣, 分辨率低
最大似然估计器 (也称最小方差估计器, ML 或 MV) ^[9]	使测量数据与预测数据在输出噪声功率最小的意义上是最佳的。以这个原则, 可以构造多种形式的距离深度估计器	相对于线性处理器, 有很强的抑制旁瓣的能力, 深度分辨率也有很大改善	对误差和失配敏感, 要求传播模型中的参数必须精确。也正因为对失配敏感, 所以该处理器常用来反演环境参数
匹配简正波处理器 (MMP) ^[10]	在简正波空间而不是水听器空间进行匹配处理	对水听器数据进行了滤波, 能把降低性能的那些简正波滤除, 降低矩阵维数	相位差有模糊, 容易引起距离定位误差; 要求高信噪比和精确的阵列布放
最佳不确定场处理器 (OUFP) ^[11]	这是一种广义 MFP, 通过引入环境不确定性先验概率来考虑用参数描述未知环境, 然后计算声源位置的最大后验估计	能在未知环境或环境模型有误差的条件下对未知声源进行定位	计算量很大

归纳起来, MFP 中的失配主要来自3个方面:

1) 环境失配

环境失配指的环境模型的不确定性, 例如, 传播模型中采用的声速差距剖面有误差, 对海底构成的假设不准确等。大量的研究显示, 环境失配对 MFP 的估计性能有很大影响, 其中水深失配和水底沉积层中声速失配的影响尤其重要。为此, 在实际中人们除了充分利用各种非声学手段对海洋环境进行各种精确测量以外, 还利用 MFP 的反演性能在精确测量声源参数的条件下对环境参数进行

实时估计, 从而获得相对精确的结果。

2) 统计失配

统计失配指 MFP 处理中需要使用协方差矩阵。其基本问题是: 如果不加先验约束条件, 任一协方差矩阵的自由度往往会超过可利用的数据快拍数, 所以, 对大型接收阵, 必须使用某种形式的既利用统计结构又利用物理约束条件的先验知识。

3) 系统失配

系统失配指的是接收系统中的误差, 如接收阵的倾斜, 水听器灵敏度和相位的漂移, 其中, MFP 对阵的倾斜尤其敏感, 有时会使 MFP 完全失效, 因此, 阵倾斜的测量和补偿算法对 MFP 非常重要。

MFP 对失配的敏感性一度曾使人们怀疑 MFP 的实用性。随着信道模型的进一步精确, 各种测量手段的发展, 以及多种补偿算法的涌现, 人们逐渐提出了很多种稳定的 MFP 处理算法, 如基于能量法则的 MFP, 白噪声增益限制 MFP, 子阵方法, 似然比 MFP 方法, 高阶遗传算法, 模拟退火算法、聚焦算法等^[1]。

5 各国的试验及结果

从70年代末开始, 各国研究人员陆续做了一些利用匹配场技术进行被动定位和反演海洋环境参数的有关试验, 获得了大量宝贵的第一手资料, 促进了 MFP 理论和技术的发展。在这些大量的试验中, 比较重要和有代表性的有:

Hamson 和 Heitmeyer 在1989年所做的浅水试验^[12]。他们采用间隔2m 的32阵元垂直直线阵, 在120m 的水中成功定位了距离达10km 的333Hz 和738Hz 的目标。在处理过程中, 他们在估计距离深度的同时估计了阵列倾斜, 这对获得良好的 MFP 结果是至关重要的。

Jesus 采用与 Hamson 和 Heitmeyer 同样的试验条件所做的宽带试验。宽带信号的作用

用是提高估计的稳定性。该试验采用的是3个指数衰减的正弦信号,中心频率都是250Hz,带宽分别为2Hz、15Hz、40Hz。在5min的时间段内,获得了距离达5km的稳定的距离深度估计。很多研究者评论:该试验是到当时为止唯一稳定的距离深度估计试验^[13]。

Gingras 和 Gerstoft^[13]在1995年所做的距离深度估计试验。该试验是在接近理想条件下实现的:垂直阵列覆盖大部分水体;水听器位置已知;有很好的环境参数先验知识。除此以外,他们采用了精确的阵列位置测量算法来搜索最佳环境参数,这种所谓的“全局前向模型参数估计”极大地提高了定位性能。

Ozard 等人所做的信道参数与距离有关情况下的试验^[14]。试验水深在150m到325m之间,他们在试验中采用了一个线跟踪器(line tracker),能够在二维表面上找到最佳路径。在60min内,能够定位距离从12km到2km里线性变化的45Hz或72Hz的单频声源。他们的结果表明:如果在MFP中采用跟踪算法,也许并不一定要求详尽的环境信息。

以上介绍的实验都是浅水试验,采用放置在水体中的固定垂直阵列。除此以外,很多研究者尝试采用沉底阵或拖曳阵,试验水深甚至达到4500m。

6 研究热点及发展方向

经过近20年的发展,匹配场领域内的研究已经由最初的理论验证阶段逐渐过度到实用阶段,当今及今后的很长一段时间内,人们都将致力于利用MFP技术解决各种实际问题。

从应用的角度,以下问题已经或将成为该领域研究的热点:(1)拖曳阵和水平阵的使用^[15]:以上介绍的匹配场研究和试验都是使用系留垂直阵,这种阵的最大缺点就是阵列倾斜失配会极大削弱MFP的处理性能。而水平拖曳阵在可动性、传感器数目和布放

等方面都有很大优点,人们已尝试将它用于MFP中;(2)宽带信号:在被动目标定位中,实际的目标信号都是宽带信号,因此,研究宽带MFP处理更具有实际意义。同时,采用宽带信号可以提高匹配处理的稳定性。在这方面人们已经做了很多理论及试验研究,并取得了一些有价值的试验结论和结果;(3)动目标定位及跟踪^[14]:这也是一个很有实际意义的研究方向。前面讨论的MFP都是在空间域进行的,为了定位目标,需要将MFP扩展到时空域,然后利用多普勒效应对动目标进行定位和跟踪。(4)多目标定位及跟踪:目前,在这方面所做的工作还很少。这个问题给MFP领域的研究者提出了巨大的挑战。

从理论研究的角度,以下问题已经或将成为领域研究的热点。(a)稳定的MFP算法以解决失配问题;(b)快速MFP算法以解决MFP计算最大而不利于实时处理的问题;(c)在低信噪比的情况下使用MFP以解决实用性的问题。

7 结论

匹配场处理技术突破了传统的水声被动定位极限,同时提供了一种探索及了解海洋环境的声学途径,极大地扩展了水声信号处理的应用领域。在这些领域的研究中,虽然已经取得了很多成果,但仍然有很多问题急待解决。

参考文献:

- [1] A. B. Baggeroer, W. A. Kuperma, et al. [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering., 1993; 18: 425 ~ 427.
- [2] Z. H. Michalopoulou and M. B. Porter. [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1996; 21 (4): 384 ~ 392.
- [3] Kazuhiko Ohta and George U. Frisk. [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1997; 22 (2): 501 ~ 521.
- [4] Paul C. Etter. Underwater Acoustic Modeling [J]. Elsevier, London, 1991.

- [5] Scott J. Levinson, Evan K. Westwood, et al. [J]. J. A. S. A., 1995; 97 (2): 1576 ~ 1585.
- [6] Michael A. Ainslie, et al. J. A. S. A., 1998; 103 (4): 1804 ~ 1812.
- [7] Robert J. Cederberg, William M. Carey, Fellow, IEEE. and William L. Siegmann, Senior Member, [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1997; 22 (2): 237 ~ 244.
- [8] Zoi-Heleni Michalopoulou. J. A. S. A., 1998; 104 (1): 163 ~ 170.
- [9] John M. Ozard and Gary H. Brooke, [J]. J. A. S. A., 1992; 91 (1): 141 ~ 150.
- [10] Han-Yang Che and I-Tai Lu. [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1994; 19 (2): 166 ~ 174.
- [11] Stacy L. Tantum and Loren W. Nolte. [J]. J. A. S. A.; 1998, 103 (1): 362 ~ 373.
- [12] R. M. Hamson and R. M. Heitmeyer. [J]. J. A. S. A., 1989; 86: 1950 ~ 1959
- [13] D. F. Gingras and O. Gerstoft. [J]. J. A. S. A., 1995; 97: 3589 ~ 3598.
- [14] J. M. Ozard, MIL Jeremy et al. [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1996; 21 (4): 377 ~ 386.
- [15] T. C. Yang, T. Yates. [J]. J. A. S. A., 1998; 103 (3): pt, 1, 1316 ~ 1330.

人物介绍

中国工程院1999年新当选院士王威琪简介

王威琪院士1939年5月30日出生于上海市(原籍江苏省海门市)。1961年毕业于复旦大学物理系。现任复旦大学首席教授、博士生导师、校学位委员会委员兼技术学科分学位委员会主席、国家医疗器械评审专家委员会委员、中国声学学会理事会医学超声分会副主委、中国仪器仪表学会医疗器械分会副理事长、中国生物医学工程学会理事、上海市生物医学工程学会副理事长,还担任中国生物医学工程学报、仪器仪表学报、应用声学、中华超声影像学杂志、中国医疗器械杂志、声学技术9种学术刊物的编委。他在医学超声学和医学电子学的理论、技术和应用方面取得多项首创或优秀的成果,荣获世界医学生物超声联合会的 Pioneer 奖、国家发明二等奖、光华科技基金二等奖、上海市科技进步二等奖4次,其他委部省市级奖12项。他在国内学术刊物上发表论文160余篇。在国外作邀请报告10余次。应邀担任东京工业大学等日本4所国立大学的客座教授和纽约科学院院士。

主要成果:基于超声、心电、计算机的无创伤评估肺动脉压、肺血流量、肺血管阻力的系统,具有创新性和先进性,它与心导管术相关性好;在无创伤检测血流上有两项发明创造,它克服不能定量的缺点;将现代理论(分形、数学形态提取、数量化理论、极点轨迹)首先引入围产医学,找到新参数比常规方法敏感,还对医用多普勒原理提出新思想,研制成国内首套血流校刻系统监测产品质量;彩色实时声谱仪等成果已产品化,有社会和经济效益。

本刊编辑部