

浅海环境参数宽带匹配场反演研究

杨坤德, 马远良, 赵亚梅, 李蓉艳

(西北工业大学航海工程学院声学所, 西安 710072)

摘要: 宽带匹配场反演是获取海洋环境参数信息的有效方法, 选择合适的反演目标函数对环境参数的估计结果十分重要。文章研究了浅海环境参数宽带匹配场反演的各种目标函数建立方法, 同时结合亚洲海实验(ASIAEX 2001)数据采用遗传全局寻优算法对该海域环境参数进行了反演, 并对反演结果尤其是沉积层参数的合理性进行了分析。

关键词: 宽带匹配场反演 目标函数 遗传算法 亚洲海实验

中图分类号: O422.2 文献标识码: A

Broadband matched-field inversion for shallow water environment parameters

YANG Kun-de, MA Yuan-liang, ZHAO Ya-mei, LI Rong-yan

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The goal of the matched field inversion (MFP) is to find the physical parameters of the environment. To overcome the inaccuracy and instability of single frequency inversion, many researchers used broadband MFP inversion to estimate the parameters. The inversion process can be separated five parts: (1) discretization of the environment; (2) efficient and accurate forward modeling; (3) reasonable objective function; (4) efficient optimization procedures; (5) uncertainty analysis. A complete inversion requires equal attention to all five items.

In this paper, broadband multi-frequencies matched-field inversion method was used to determine the environment parameters in shallow water. According to different conditions, several broadband objective functions were presented. Using ASIAEX2001 (Asian Seas International Acoustics Experiment) experimental data from explosive sources in the ECS (East China Sea) and genetic algorithms, we got the environment parameters especially in sediment and analyzed the inversion results.

Key words: objective function; matched-field inversion; genetic algorithms; ASIAEX 2001

引言

环境参数反演包含 5 个紧密相关的部分: 环境模型的建立与测量数据的分析, 有效且精确的前向传播模型, 目标函数的选取, 高效的全局寻优算法, 不确定性和唯一性分析^[1,2,4]。环境模型的建立主要是收集反演所需要的物理信息并根据测量的数据确定待反演的参数, 通过这一步就确定了已知的环境参数和未知环境参数的边界。将环境参数代入精确有效的前向传播模型计算得到拷贝场数据, 并与测量场进行匹配场处理, 得到相应的目标函数, 引入全局寻优算法, 最后得到使目标函数最小的环境参数反演结果, 对反演结果进行后验概率分析, 可以得到反演结果的不确定性和唯一性结果。由于海洋声传播的频率依赖性, 用宽带匹配场反演可以利用更多的声场传播信息, 取得更精确、更稳健的结果。宽带匹配场处理的目标函数对于取得好的反演结果十

分重要, 本文重点研究宽带匹配场反演中目标函数的建立方法, 对遗传算法的原理作了介绍, 并对亚洲海浅海环境参数进行了反演。

1 方法

1.1 目标函数分析

由于海洋声传播的频率依赖性, 用宽带匹配场反演可以取得更精确、更稳健的结果。假定 p 和 q 分别为观察数据场和拷贝数据场, 是相应时间序列的傅立叶变换。 p 和 q 包含了多个频率 N_{freq} , 多个深度 N_{dep} , 多个距离 N_x 。

在计算目标函数之前, 可能要将数据转化为其它形式, 如有时只考虑计算数据和观察数据的幅度信息: $p_{ijk} = |p_{ijk}|$, $q_{ijk} = |q_{ijk}|$
有时将数据转化为分贝形式:

$$p_{ijk} = -20 \log |p_{ijk}|, p_{ijk} = 20 \log |p_{ijk}|$$

其中 $i = 1, \dots, N_{freq}, j = 1, \dots, N_{dep}, k = 1, \dots, N_x$ 。

最常用的是基于最小均方误差的目标函数:

$$\phi = |1 - \sum_{i=1}^{N_{freq}} \sum_{j=1}^{N_{dep}} \sum_{k=1}^{N_x} \hat{p}_{ijk}^* \hat{q}_{ijk}| \quad (1)$$

收稿日期: 2001-09-20; 修回日期: 2001-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(60072025)

作者简介: 杨坤德(1974-), 男, 四川人, 博士研究生, 主要研究方向: 水下信息处理。

其中“*”表示向量或矩阵的复共轭,“^”表示向量的估计值。若对每个频率的 Bartlett 功率进行非相干求和,目标函数通过接收的信号对每个频率进行加权,则构成如下最大似然目标函数:

$$\phi = \frac{1}{N_x N_{freq}} \sum_{k=1}^{N_x} \sum_{i=1}^{N_{freq}} \left[\sum_{j=1}^{N_{dep}} |p_{ijk}|^2 - \frac{\left| \sum_{j=1}^{N_{dep}} p_{ijk}^* q_{jk} \right|^2}{\sum_{j=1}^{N_{dep}} |q_{jk}|^2} \right] \quad (2)$$

对每个频率的 Bartlett 功率进行非相干求和,而对每个频率进行相同的加权,则目标函数变为:

$$\phi_l = 1 - \frac{1}{N_x^2 N_{freq}} \sum_{k=1}^{N_x} \sum_{i=1}^{N_{freq}} \left[\frac{\left| \sum_{j=1}^{N_{dep}} p_{jk}^* q_{jk} \right|^2}{\sum_{j=1}^{N_{dep}} |p_{ijk}|^2 \sum_{j=1}^{N_{dep}} |q_{jk}|^2} \right] \quad (3)$$

类似于经典的时域匹配滤波,采用频域的匹配滤波,在深度与距离上进行非相干求和,而在频率上进行相干求和,则得到以下目标函数:

$$\phi_f = 1 - \frac{1}{N_x N_{dep}} \sum_{k=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_{dep}} \left[\frac{\left| \sum_{i=1}^{N_{freq}} p_{ijk}^T q_{ijk} \right|^2}{\sum_{i=1}^{N_{freq}} |p_{ijk}|^2 \sum_{i=1}^{N_{freq}} |q_{ijk}|^2} \right] \quad (4)$$

假设声源信号的幅度已知而相位未知,用接收信号对各个频率进行加权得到:

$$\phi = \frac{1}{N_x N_{freq}} \sum_{k=1}^{N_x} \sum_{i=1}^{N_{freq}} \left[\sum_{j=1}^{N_{dep}} |p_{jk}|^2 + \left| S_i \right|^2 \sum_{j=1}^{N_{dep}} |q_{jk}|^2 - 2 \left| S_i \right| \sum_{j=1}^{N_{dep}} p_{ijk}^* q_{jk} \right] \quad (5)$$

如果数据进行过校准,因此传播损失的绝对值已知,可用数据的幅度信息构造目标函数:

$$\phi_{nx} = \sum_{i=1}^{N_{freq}} \sum_{j=1}^{N_{dep}} \sum_{k=1}^{N_x} (|p_{jk}| - A_{ij} |q_{jk}|)^2 \quad (6)$$

若无偏移校正,则 $A = 1$, 若需偏移校正,选择 A 为:

$$A_{nj}^2 = \frac{\sum_{k=1}^{N_x} |p_{jk}|^2}{\sum_{k=1}^{N_x} |q_{jk}|^2} \quad (7)$$

以上式(1)~(7)是直接采用数据向量来构造反演的目标函数。在噪声场环境中,用接收阵声场的协方差矩阵比用单独数据向量来进行匹配场处理更

稳健,以下是采用测量数据和拷贝数据的协方差矩阵来构造目标函数。

对于观察数据矢量 $p_{ijk} (i = 1, \dots, N_{freq}, j = 1, \dots, N_{dep}, k = 1, \dots, N_x)$, 某一频率和距离上的协方差矩阵为: $R_{jl, ik} = p_{ijk} p_{ilk}^T$ 采用 Bartlett 功率构造目标函数:

$$\phi_c = \sum_{i=1}^{N_{freq}} \sum_{j=1}^{N_{dep}} \sum_{k=1}^{N_x} (R_{jj, ik} - q_{jk}^* \sum_{l=1}^{N_{dep}} R_{jl, ik} q_{lk}) \quad (8)$$

如果噪声是均值为常量或已知的高斯噪声,则上面的目标函数是最大似然估计。如果噪声未知或依赖于频率,用乘积代替求和可以得到最大似然估计:

$$\phi_c = \sum_{i=1}^{N_{freq}} \sum_{k=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_{dep}} [R_{jj, ik} - q_{jk}^* \sum_{l=1}^{N_{dep}} R_{jl, ik} q_{lk}] \quad (9)$$

由上面的分析可知,根据不同的应用环境选取不同的目标函数将有利于得到合理的反演结果。

1.2 遗传算法

遗传算法来源于生物进化论的观点,其寻优的过程如图1所示^[1,4],首先随机产生一定数量的初始群体(海洋环境模型参数矢量),将群体中的每个个体代入前向模型计算其适配度(目标函数的大小),根据适配度的大小选择出若干对的母体,两个母体进行交叉和突变两步遗传操作,产生同样数量的后代,并计算每个后代的适配度,根据适配度选择一定数量的后代代替初始群体中适配度较差的个体。如此反复循环,最后产生的后代适配度最好,就得到了最优的环境参数矢量。

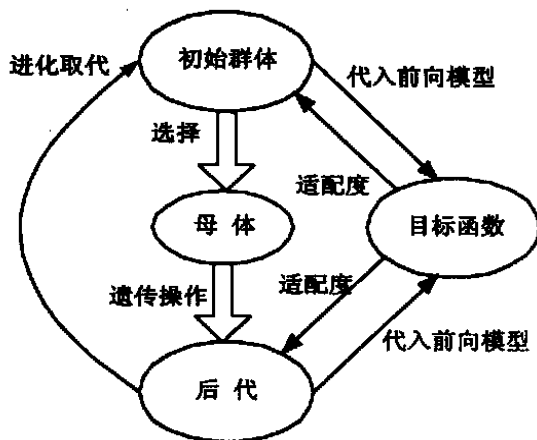


图1 遗传算法原理图

2 实验数据分析

2.1 实验介绍

中科院声学所、国防科工委(西工大等单位)以

及国家海洋局和美方合作,于2001年5月27日至6月10进行了亚洲海联合水声考察(ASIAEX2001)。实验的海区如图2所示,由以下4点围成的矩形区域:A(30°N,126.5°E),B(30°N,128°E),C(28°N,128°E),D(28°N,126.5°E)。本次实验主要进行了宽带源传播实验和混响实验,其中宽带源采用定深50m的信号弹,投弹的轨迹如图3所示,投弹船实验2号分别沿半径ME段、圆周EE段、东南直径方向FH投弹。接收船有位于M点的实验3号和位于R点的Melville号。

反演的参数包括如表1所示的11个参数。

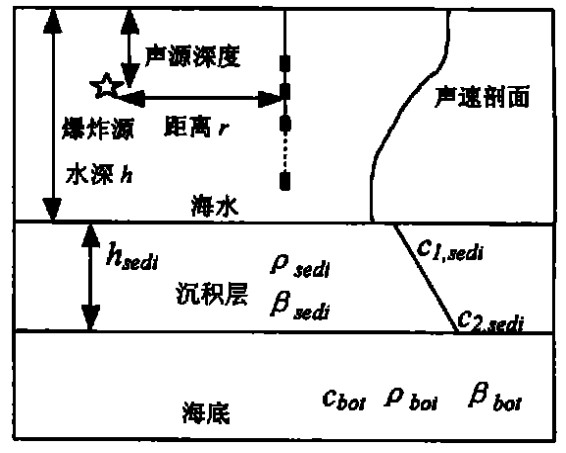


图4 浅海环境模型

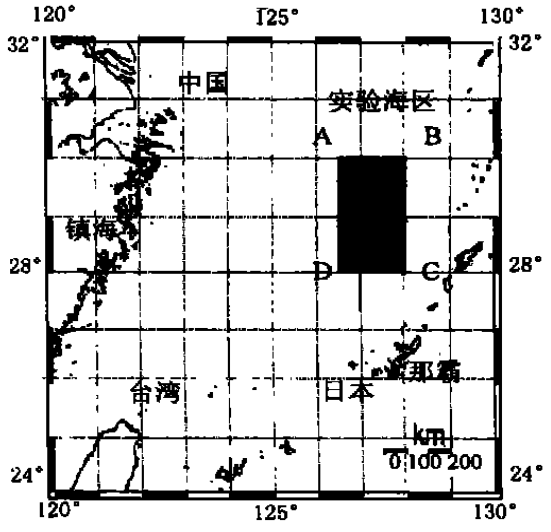


图2 实验位置

2.3 反演结果

采用上面所建立的环境模型进行海洋环境参数反演,信号源取半径ME段上距离接收船Melville号20.7km的38g信号弹,投弹设定深度为50m,接收阵采用间距为4m的14元垂直阵,最顶端的水听器离海面34.6m。选取信噪比较大的7个频率:44Hz、72Hz、102Hz、170Hz、242Hz、244Hz、246Hz,采用目标函数(8)式并运用遗传算法进行全局寻优,得到的反演结果如表1所示。

表1 亚洲海环境参数反演结果

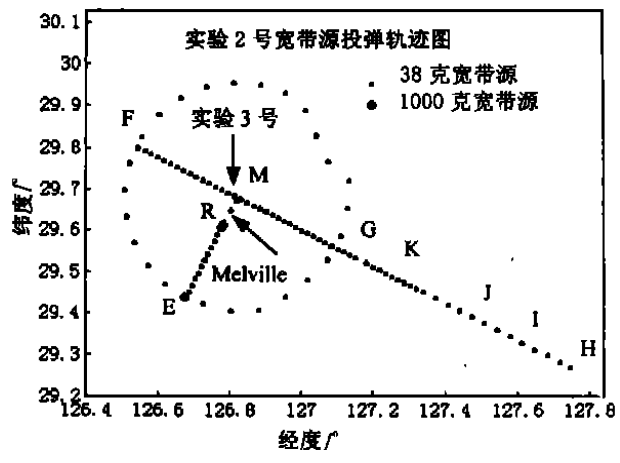


图3 宽带传播实验投弹轨迹

| 反演参数 | 搜索范围 | 反演结果 | 参考值或范围 | 误差 | |
|-------|--------------------------------------|-----------|----------|---------|--------|
| 水深 | h/m | 100-110 | 103.937 | 105.0 | -1.063 |
| 距离 | r/km | 19-22 | 21.365 | 20.691 | 0.673 |
| 声源深度 | h_{soi}/m | 45-55 | 50.143 | 50.0 | 0.143 |
| 沉积层 | $\beta_{sedi}/dB \cdot \lambda^{-1}$ | 0.0-1.4 | 0.394 | 0.0-1.0 | ... |
| 沉积层密度 | $\rho_{sedi}/g \cdot cm^{-3}$ | 1.7-2.1 | 1.810 | 1.9 | -0.09 |
| 沉积层 | $c_{1,sedi}/m \cdot s^{-1}$ | 1550-1700 | 1615.4 | 1612 | 3.4 |
| 沉积层 | $c_{2,sedi}/m \cdot s^{-1}$ | 1550-1800 | 1681.210 | 1641 | 41.21 |
| 沉积层厚度 | h_{sedi}/m | 5-25 | 11.667 | 8-12 | ... |
| 海底 | $\beta_{bot}/dB \cdot \lambda^{-1}$ | 0.0-0.4 | 0.276 | ... | ... |
| 海底声速 | $c_{bot}/m \cdot s^{-1}$ | 1700-2000 | 1966.667 | ... | ... |
| 海底密度 | $\rho_{bot}/g \cdot cm^{-3}$ | 1.9-2.5 | 2.210 | ... | ... |

从表中可以看出,水深、距离和声源深度的反演误差较小。东中国海2000年实验对沉积层上表面声速和沉积层厚度进行了测量,得到了一定范围值。2001年实验过程中对沉积层进行了若干点的采样,表1中沉积层上下表面声速和沉积层密度的参考值为其中靠近ME段的采样结果(E126°41.57',N29°44.092'),由此可以看出反演结果接近采样测量值。

2.2 环境模型

采用如图4所示的3层环境模型,ME段海域水深约105m,接收船和发射船测得的海水声速剖面相差很小,可以近似为水平不变的环境。若信号源和接收点的距离较远,只考虑纵波的作用,忽略横波的影响。由于海水声速剖面为已知,为了减少反演参数的数量,海水声速剖面不作为反演参数。这样,

东中国海2000年实验对该海域沉积层类型进行了归纳,认为沉积层上表面为含沙量较高的淤泥(sandy-silt),以下为含淤泥较多的粘土层(silty-clay)、含粘土较多的淤泥层(clayey-silt)和含沙较高的淤泥层(sandy-silt)3种交替构成。Hamilton

在文献^[3]中对浅海大陆架沉积层地声模型实验结果进行了总结,对上述类型的沉积层密度范围是 $1.4\text{g}/\text{cm}^3 \sim 2.0\text{g}/\text{cm}^3$,速度范围是 $1520\text{m}/\text{s} \sim 1652\text{m}/\text{s}$,沉积层衰减系数范围为 $0.01\text{dB}/\lambda \sim 1.0\text{dB}/\lambda$ 。因此,沉积层反演结果均在经验值范围之内。由于海底底质测量实验未进行,所以海底属性有待进一步证实。

3 结 论

本文根据不同的应用环境,研究了建立各种宽带匹配场反演目标函数的方法,并采用遗传寻优算法进行亚洲海浅海环境参数的反演,分析表明,反演结果与测量值或地声模型经验值较为一致,这对于

我国东海大陆架海域环境参数尤其是地声属性的进一步研究具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] Gopu R. Potty, James H. Miller. Tomographic inversion for sediment parameters in shallow water[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2000, 108(3): 973-986.
- [2] J. P. Hermand, P. Gerstoft. Inversion of broad-band multitone acoustic data from the YELLOW SHARK summer experiments [J]. IEEE J. Oceanic Eng., 1996, 21(2): 324-3246.
- [3] Edwin L. Hamilton. Geoacoustic modeling of the sea floor [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1980, 68(5): 1313-1340.
- [4] Peter Gerstoft. Inversion of seismoacoustic data using genetic algorithms and a posteriori probability distribution [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1994, 95(2): 770-782.

人物介绍

祝贺超声医学专家徐智章教授七十华诞

2002年7月是超声医学专家徐智章教授的七十华诞。徐教授曾任中国声学学会理事;中国声学学会超声医学工程分会副主任委员。现任第五届上海市声学学会副理事长;中国医学影像技术研究会副会长;中国生物医学学会医学超声工程分会主任委员;中华医学会超声医学分会副主任委员;上海市生物医学工程学会副理事长;上海《声学技术》杂志副主编;世界超声医学生物学会联合会委员(WFUMB);亚洲超声医学生物学会联合会会员(AFUMB);1992年获国务院颁发突出贡献及政府特殊津贴证书。

徐智章教授是江苏昆山市人,1955年毕业于上海第一医学院医学系本科,1955年~1960年在上海一医附属中山医院普外科任主治医师,1958年即进行A超诊断研究,创建超声诊断室,1962年创建医用电子室,1978年创建超声诊断研究室,研制成功手动式B型(ABP)、M型超声心动图及多普勒超声血管诊断仪以及相关仪器设备,并在我国首先应用于临床。1986年晋升正教授;1998年任荣誉教授;2001年任终身荣誉教授。

徐智章教授以精湛的医术长期致力于超声医学临床工作,而且还长期致力于超声医学研究和教育工作。并善于与其它声学工程学科密切合作,如对我国自行研制的实时B超仪器,他提供了预研经验和鉴定工作。受到各研制单位的好评与感谢。在1988年他荣获由WFUMB和AIUM(美国超声医学会)联合颁发的“超声医学先驱者奖”(Pioneer Award)。

徐智章教授的科研成果及专著有:“维生素丙与碳酸钠超声造影剂在二氧化碳超声造影中研究课题,在1982年获卫生部科技成果二等甲级奖;“彩色Dopple和脉冲Dopple在肝癌特异性诊断中的应用”课题,在1992年获卫生部科技进步三等奖。他在国内外学术刊物和学术会议上公开发表科研论文共50余篇。主编超声医学专业著作有4部;参编专著26部。他主编的4部专著名称如下:徐智章主编:“肝脏局灶性病变超声诊断学”北京:世界图书出版公司出版,1991年,王纯正、徐智章主编:“超声诊断学”北京:人民卫生出版社出版,1993年;燕山、徐智章、党渭楞主编:“超声成像原理及腹部诊断”上海:交通大学出版社出版,1997年;徐智章主编:“现代腹部超声诊断学”北京:科学出版社出版,2001年。这4部专著共有245万字,是有理论有实践的专业教育书籍,深受广大超声医学工作者和大专院校师生欢迎。

徐智章教授长期以来热心组织、主持国内、国际超声医学学术交流活动和学会工作,为提高和加强我国的超声医学学术水平,做出了很大贡献,使我国广大中青年超声医学工作者受益匪浅。如1995年在北京组织并主持召开“第四届亚洲超声医学生物学会学术大会,这次大会有来自国内外的代表共千余名,会议取得圆满成功;又如1996年与美国Thomas Jefferson大学合作成立“中山——杰斐逊”(Zhong Shan-Jefferson)超声诊断教育中心,并任中心主任。此教育中心办班内容有3种:1.彩超血流成像及血流动力学临床应用新进展;2.医学超声基础理论、新技术与临床分析;3.诊断性超声与介入性超声在肝癌诊断中的应用。此教育中心是世界卫生组织(WHO)超声诊断继续教育的世界唯一的合作中心的分中心。1996年徐教授受WHO委托参加研讨及编写题为:“超声诊断培训:要点、原理和标准”。

徐智章教授虽年届七十,他仍精力充沛孜孜不倦地致力于我国医学超声事业。仍任“中山——杰斐逊”超声医学诊断中心主任;2000年任复旦大学生物医学工程学科建设小组成员;同年任上海市超声质量控制中心主任。他热爱祖国、严谨治学、医术精湛、勤奋好学。为我国超声医学事业创新而努力的工作精神,是我们学习的榜样。值徐智章教授七十华诞之际,我们衷心祝愿他健康、长寿、万事如意。

上海市声学学会办公室