

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.02.014

浅海聚焦定位中简化地声模型的应用研究

屈科, 何树斌, 黎章龙

(广东海洋大学 电子与信息工程学院, 广东 湛江 524088)

摘要: 为了提高定位算法的环境宽容性, 聚焦法将环境参数纳入了寻优空间。聚焦法虽然降低了对环境测量的要求, 但是反演参数的增加也增加了反演的复杂性。基于海底反射特性, 用两个参数对海底进行建模。通过标准的反演测试问题对简化地声模型在浅海聚焦定位中的有效性进行了分析。结果表明: 基于简化地声模型的聚焦定位是可行的。在获得正确定位结果的同时, 随着地声参数个数的减少, 匹配场处理的便捷性得到了提高。文中引入的简化地声模型是聚焦问题中参数最少的地声模型, 它可以有效减少聚焦定位参数维数以提升反演的便捷性。同时, 简化地声模型在参数敏感性和耦合性上有较好的表现, 这些优点可以保证定位结果的稳健性。

关键词: 聚焦法; 匹配场处理; 遗传算法; 地声参数

中图分类号: P714+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-2029(2019)02-0092-06

聚焦法(Focalization)是应对匹配场处理中环境失配问题的经典方法^[1-4]。由于将环境参数引入寻优, 反演的复杂性随着参数空间的维数增加^[5]。作为波导环境的重要部分, 地声模型的选择一直是浅海匹配场应用中的一个关键问题^[6]。从经典的三个参数的液态半无限海底模型到多达数十个参数的地声模型^[7], 地声模型的选择往往让人进退维谷。随着参数的增加地声模型有可能与真实情况更贴近, 但是参数的增加也会增加反演的复杂度, 使测量与寻优过程变得复杂。从海上实际应用的角度来讲, 在保证一定精度的基础上选择简单的地声模型进行匹配场应用是地声模型选择的一个重要方向^[8]。

本文利用两个反射参数对海底进行建模, 基于这种当前参数最少的地声模型进行聚焦反演。利用标准的反演测试问题进行实验研究, 对简化模型下的定位效果进行评估, 结果表明简化模型可以保证定位的准确性。利用贝叶斯后验概率分布、代价函数及模糊平面等指标对简化模型在反演中的表现进行了分析, 其结果表明简化模型的参数具有较好的敏感性且能避免参数间的耦合问题。所提出的简

化地声模型可以应用于浅海声源定位, 在保证定位结果准确性的前提下能有效降低聚焦法求解空间的维数, 降低反演实施的复杂性。

1 简化地声模型

海底反射导致的较大传播损失是浅海声传播的一个重要特征。考虑远距离传播的情况, 大掠射角的声线在海底反射中有较大的反射损失且掠射角越大与海底反射次数越多, 因此这些声线的能量在远场几乎损耗殆尽, 对声场影响较小。与之相反, 小掠射角声线的反射损失较小且反射次数较少, 在远距离仍然有效, 是构成远距离声场的主要成分。除此之外, 大量的理论计算与观测数据表明, 小掠射角下海底反射损失随掠射角线性增加。依据上述的客观事实, 许多海底反射参数被用来描述海底的地声特性^[9-15]。例如: 尚尔昌提出用三参数模型来描述海底, 并据此讨论浅海传播的 4 个区域^[9]; Weston 提出利用海底反射阻抗计算声场的平均传播损失^[10]; Harrison 讨论了海底反射损失的线性近似并提出反

收稿日期: 2019-01-23

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(2014A030310256); 大学生创新创业训练计划资助项目(CXXL2016009, CXXL2017129); 广东海洋大学本科生创新创业团队项目资助(CCTD201822)

作者简介: 屈科(1984-), 男, 博士, 主要研究方向为海洋声学反演问题。E-mail: quke09@mails.ucas.ac.cn

射损失参数计算浅海混响^[11-12]等。其中三参数模型又被进一步被简化为 P, Q 两个参数,用于计算声场格林函数^[13]以及波导不变量^[14]。上述的研究成果表明了简化的地声模型仍然有较好的声场计算与分析能力。与前述建模原理相近,屈科等^[15]提出利用单个海底反射参数来表示海底,并将这个参数与声场特征量建立了线性关系,进行了地声反演的应用^[16-17],本节将简单介绍相关的一些理论。

考虑小掠射角下的海底反射特性,海底反射损失 BL 近似随掠射角 φ 线性增加,可以表示为:

$$BL = F \cdot \varphi \quad (1)$$

式中: F 即为浅海海底单参数,它的物理意义是小掠射角下海底反射损失随掠射角的变化率,单位为 $\text{dB} \cdot \text{rad}^{-1}$ 。尽管单参数可以有效计算浅海远场的非相干传播损失,但是这种缺乏相位信息的表达办法无法有效计算浅海相干声场,进而限制了其在匹配场中的应用。因此,通过推导液态半无限海底的反射相位变化,衰减较小的低阶简正波相位变化 θ_F 可以表示为:

$$\theta_F = -\pi + \frac{\pi}{\varphi_c} \varphi \quad (2)$$

式中: φ_c 为海底反射临界角。根据海底反射损失的变化规律,一般认为临界角以内的声线的反射损失比较小,符合掠射角对于“小”的要求。将反射临界角内的声线认为是有效的小角度声线,伴随着掠射角从零变化到临界角,反射相位变化实际上是线性从 $-\pi$ 变化到零的。这里定义一个海底等效声速 C_F ,得到:

$$\theta_F = -\pi + \frac{\pi}{\cos(c_w/c_F)} \varphi \quad (3)$$

式中: c_w 是海底附近的海水声速。通过式(1)与式(3)可以分别通过 F 和 c_F 计算海底反射的模与相位变化,进而输入简正波计算程序计算相关声场^[18],实现匹配场聚焦定位的应用。

2 聚焦定位实验

2.1 标准的反演测试问题

为了评价不同的匹配场处理方法,美国海军实验室(Naval Research Laboratory)在1993年进行了专门的研讨会,给出了一组标准的仿真数据用于测试不同的匹配场处理方法,称为标准的反演测试问题^[19]。

根据本文的研究目标,这里选取了彩色噪声案例(COLNOISE)进行反演实验分析,实验的波导环境如图1所示。测试问题为水平不变波导,海深100 m。海水声速为恒定负梯度,从水面1500 m/s变化到水底1480 m/s。声源的深度为66 m,距离接收端9.1 km,频率为250 Hz。海底为两层海底,第一层厚度为200 m,声速为恒定正梯度,表面声速为1600 m/s,底部声速1750 m/s;第二层为半无限空间,声速恒定为1750 m/s。整个海底的密度与声衰减系数恒定,分别为 1.8 g/cm^3 以及 $0.2 \text{ dB}/\lambda$ 。为了研究简化地声模型在聚焦定位中的特性,后续反演中的待反演参数为声源深度 s_d 、声源距离 r 以及用 F 和 c_F 两个参数表示的海底,海水声速剖面设为已知量。测试问题提供的数据中还添加了彩色噪声用于模拟舰船、波浪、生物等噪声对定位的影响,信噪比为40 dB。“测量”数据为20元垂直阵接收的声压信号,阵元从5~100 m均匀分布。

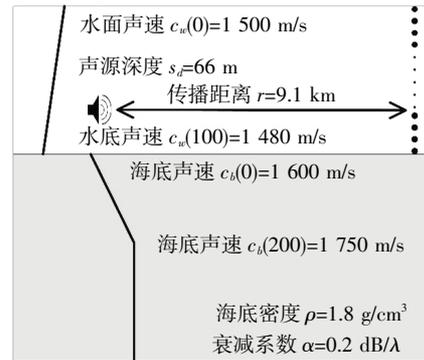


图1 彩色噪声案例波导环境

Fig.1 Waveguide environment of the COLNOISE case

2.2 聚焦定位方法

聚焦法泛指声源信息与波导环境信息不确定或部分不确定下的匹配场处理方法,将海洋环境视作透镜通过代价函数对声源的位置进行聚焦。因此,聚焦法的主要目标是准确的定位声源,对海洋环境的反演相对次要,本文主要关注简化模型下定位结果的准确性。聚焦定位法的流程如图2所示。首先根据搜索空间随机生成初始种群,通过简正波计算模型生成拷贝场与垂直阵信号进行匹配,利用代价函数判断种群个体的优劣以便更新种群。通过不断的寻优过程获得全局最优,最后对寻优过程的样本进行贝叶斯后验概率估计,获得最终完整的结果。各个环节的具体实施办法如下:

在反演前首先设置待反演参数的搜索空间。由于采用了简化的地声模型,研究中待反演参数仅4

个,根据波导环境预设了搜索空间:声源深度 sd 的搜索区间为 0~100 m,网格为 1 m;声源距离 r 的搜索区间为 5~10 km,网格为 0.1 km; F 的搜索区间为 0.5~4 dB/rad, 网格为 0.01 dB/rad; c_F 的搜索区间为 1 550~1 800 m/s, 网格为 1 m/s。

参数的寻优采用遗传算法 (Genetic Algorithms), 通过模拟自然群体遗传演化机制来获得全局最优^[4]。算法的参数设置为:种群数 100、选择概率 0.5、交叉概率 0.8、变异概率 0.08、共遗传 5 000 代。为了保证结果的收敛以及采集贝叶斯后验概率分析的样本,采用了 20 组并行运算的方式。

代价函数选用 Bartlett 处理器,用于对“测量”的垂直阵信号与拷贝场信号声压进行匹配,表达式为:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\left| \sum_{i=1}^N Q_i P_i(m)^* \right|^2}{\left[\sum_{i=1}^N |Q_i|^2 \right] \left[\sum_{i=1}^N |P_i(m)|^2 \right]} \quad (4)$$

式中: Q 为垂直阵信号声压; $P(m)$ 为用搜索空间中的向量 m 计算的拷贝场信号声压; i 为水听器的序号,其总数 N 为 20;* 表示共轭。代价函数的实质是求两个信号的相关性,当代价函数值 ε 为零即是最完美匹配。

根据贝叶斯反演理论,结果的后验概率分布也是反演问题的结果。在遗传算法的寻优过程中,所有随机生成的样本均保存下来以便进行后验概率分析。根据 Gerstoft 提出的方法^[20],第 k 个参数矢量的后验概率 $\sigma(m^k)$ 为:

$$\sigma(m^k) = \frac{\exp[-\varepsilon(m^k)/T]}{\sum_{j=1}^{N_{obs}} \exp[-\varepsilon(m^j)/T]} \quad (5)$$

式中: N_{obs} 为不重复的样本数量; T 类似于模拟退火中的温度参数,可以取前 50 个最优代价函数的平均值。对于向量 m^k 中第 l 个参数取值 κ 时的边缘密度分布 $\sigma(m_l=\kappa)$ 为:

$$\sigma(m_l=\kappa) = \frac{\sum_{j=1}^{N_{obs}} \exp[-\varepsilon(m^j)/T] \delta(m_l^j=\kappa)}{\sum_{j=1}^{N_{obs}} \exp[-\varepsilon(m^j)/T]} \quad (6)$$

式中: δ 为狄拉克函数。通过 $\sigma(m_l=\kappa)$ 的边缘密度分布,可以对结果的稳健性进行有效的分析。

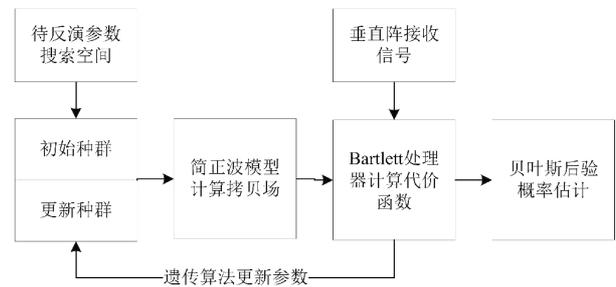


图 2 反演流程

Fig.2 Inversion process

3 聚焦定位结果分析

多组并行寻优的结果均收敛于相同的结果,当声源深度 sd 为 66 m、声源距离 r 为 9.1 km、 F 为 1.90 dB/rad 以及 c_F 为 1 628 m/s 时代价函数最小。从寻优的结果来看,简化地声模型在降低寻优空间维数的同时可以获得正确的定位结果。

图 3 为反演结果的边缘概率密度分布。所有的参数均以最高概率收敛于全局最优值,反演结果的可信度高。对于声源的深度和距离两个值,除结果的真值外的概率密度几乎为零,表现出非常好的唯一性,定位的结果准确且可靠。对于反演的两个地声参数,其概率密度分布在一定的区间内, F 为 1.5~2.5 dB/rad, c_F 为 1 600~1 650 m/s。在地声参数对应区间外的概率密度基本为零,即使缺乏待反演海域的先验信息,将寻优区间设置得很大也不会影响结果的准确性。同时,随着参数偏离全局最优值,所有参数的边缘概率密度均迅速下降,不存在明显的旁瓣,结果的唯一性较好。从后验概率的分布来看,基于简化地声模型的聚焦定位方法是可行的。当待求解的参数减少,势必会减少寻优的计算量;同时待求解参数的减少也意味着需要的已知条件也有可能减少,这在实际应用中意味着海上测量的简化。简化的地声模型从降低寻优维数出发,可以有效降低求解问题的复杂性,同时也保证了定位结果的准

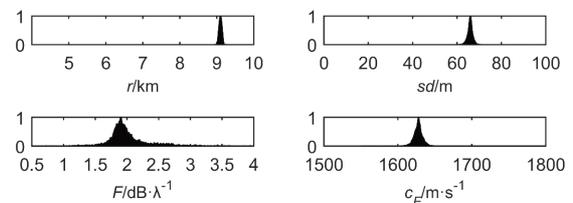


图 3 反演结果的后验概率分布

Fig.3 Posterior probability distribution of the inversion result

确性。

图 4 和图 5 为代价函数随两个地声参数(其他参数取最优值)的变化图。可以看出两个海底参数的代价函数都呈现出单拱形态,代价函数随着远离最优值的距离单调变大,这样的结果可以避免在寻优过程中陷入局部最优。实际上这样的结果在设计简化地声模型前是可以预估到的,因为先前基于单参数模型的线性反演就是利用了这样的性质^[16-17]。同时,代价函数随着海底参数的值有明显的变化。在预设的寻优范围内,地声参数引起的代价函数变化范围覆盖了 0.7 到 0.1 的区间,这说明代价函数对地声的变化是敏感的。两个参数的单调性及敏感性对快速获得全局最优,避免陷入局部最优是非常有利的。可以预见的是,当阵元个数、信噪比等条件变差时,模型具有的单调性和敏感性特征对于避免陷入局部最优是有一定益处的。

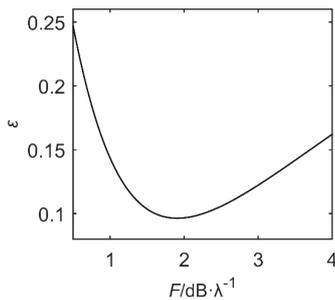


图 4 代价函数随 F 的变化

Fig.4 Cost function values for different F

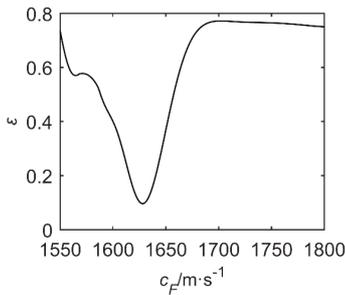


图 5 代价函数随 c_F 的变化

Fig.5 Cost function values for different c_F

图 6 是两个地声参数(其他参数取最优值)的模糊平面。根据遗传算法的寻优结果,代价函数在远离最优值处不断变大,模糊平面上基本不存在局部最优点。与图 4 和图 5 对应, F 代价函数的主要变化区间为 1.5~2.5 dB/rad, c_F 代价函数的主要变化区间为 1 600~1 650 m/s,当地声参数偏离这一区间时,代价函数大于 0.5,远大于全局最优值。在地声参数的主要变化区间内,全局最优点与后验概率密

度的最大点对应。模糊平面中从全局最优点出发的任何方向,离最优点越远代价函数越大,基本不存在参数间耦合引起的代价函数起伏现象。参数间的耦合容易导致反演结果的多值性,从而增加寻优的难度以及结果的不确定性,而两个相互间没有明显耦合的地声参数可以规避这样的问题,提高匹配处理的性能。

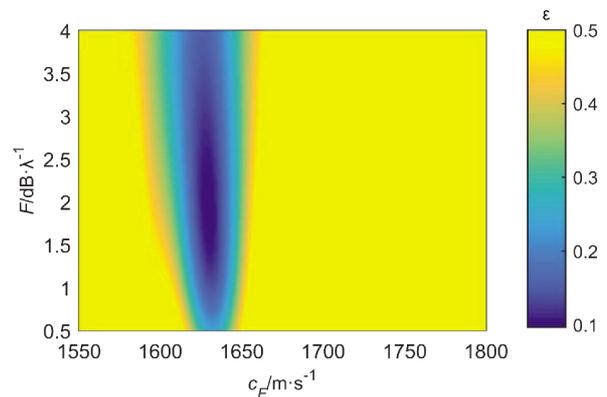


图 6 模糊平面

Fig.6 Ambiguity surface

4 结论

由于实际应用中海洋环境信息的掌握存在不确定性,常规匹配场处理面临环境参数失配带来的性能下降问题。而海底地声参数由于海底及现场测量的复杂性,往往都是不确知的。采用聚焦定位方法可以一定程度上提高定位算法的环境宽容性,但是其复杂性随着地声模型参数的个数增加。本文基于海底反射特性,提出了一种用于匹配场处理参数最少的简化地声模型,利用标准的反演测试问题对定位性能进行了分析,得出以下结论:(1) 基于简化地声模型的浅海聚焦定位是可行的,仅包含两个参数的简化地声模型能保证足够精度的声场描述能力以满足匹配场定位的需要,最终获得正确的定位结果。(2) 随着地声参数的减少,寻优空间的维数降低,一定程度上减少了匹配场处理的计算量。(3) 基于反射模与反射相位变化的两个地声参数在匹配场处理中表现出较好的敏感性,参数间没有明显耦合现象,这对提升寻优的速度以及结果的稳健性是有益的。

简化地声模型对浅海远场定位的便捷性有一定的提升,但是减少地声模型的参数必然会导致其描述声场特征量的精度下降,这种类型的失配对聚

焦定位的结果是有影响的。评估失配的影响,综合考虑结果准确性与方法便捷性是简化地声模型匹配场应用研究的下一步工作。

参考文献:

- [1] Collins M D, Kuperman W A. Focalization: Environmental focusing and source localization [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 90(3):1410–1422.
- [2] 李倩倩,李整林,张仁和.不确定海洋环境下的贝叶斯声源定位法[J].声学学报,2014, 39(5):535–543.
Li Q Q, Li Z L, Zhang R H. Bayesian localization in an uncertain ocean environment[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2014, 39(5):535–543.
- [3] Fallat M R, Dosso S E. Simplex simulated annealing: A hybrid approach to geoacoustic inversion[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 103(5):2934.
- [4] Gerstoft P. Inversion of seismoacoustic data using genetic algorithms and a posteriori probability distributions [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1994, 95(2):770–782.
- [5] 孙超,刘宗伟.不确定海洋环境中的模态子空间重构稳健目标定位方法[J].物理学报, 2014, 63(5):034304.
Sun C, Liu Z W. Robust source localization based on mode subspace reconstruction in uncertain shallow ocean environment [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(5):034304
- [6] 李整林,彭朝晖.浅海中海底模型与反演方法的选取[J].声学技术, 2003, 22(z2):116–118.
Li Z L, Peng Z H. Bottom model and geoacoustic inversion methods[J]. Technical Acoustics, 2003, 22(z2):116–118.
- [7] Ageeva N S, Krupin V D, Perelygin V P, et al. Development of a geoacoustic model of a shallow sea floor[J]. Acoustical Physics, 1994, 40(2):159–165.
- [8] 孙雯,屈科,胡长青.浅海相干声场的单参数海底模型建构[J].声学技术, 2013, 32(3):192–197.
Sun W, Qu K, Hu C Q. Single parameter seabed modeling in shallow water interference field [J]. Technical Acoustics, 2013, 32(3): 192–197.
- [9] 尚尔昌.海底反射参数对平均场强结构的控制[J].海洋学报, 1979, 1(1):58–64.
Shang E C. The averaged intensity structure determined by the parameters of the bottom–reflection–loss [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1979, 1(1):58–64.
- [10] Weston D E. Intensity–range relations in oceanographic acoustics[J]. Journal of Sound & Vibration, 1971, 18(2):271–287.
- [11] Harrison C H, Simons D G. Geoacoustic inversion of ambient noise: A simple method [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 112(4):1377–1389.
- [12] Harrison C H, Nielsen P L. Multipath pulse shapes in shallow water: Theory and simulation [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2007, 121(3):1362–1273.
- [13] Zhao Z D, Li M, Shang E C. Modeling of Green's function with bottom reflective parameters (P, Q) instead of GA parameters[J]. Journal of Computational Acoustics, 2014, 22(01):1440005.
- [14] Shang E C, Wu J R, Zhao Z D. Relating waveguide invariant and bottom reflection phase–shift parameter P in a Pekeris waveguide [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 131(5):3691–3697.
- [15] 屈科,胡长青,赵梅.浅海海底单参数快速反演模型研究[J].声学技术, 2012, 31(2):152–155.
Qu K, Hu C Q, Zhao M. Single parameter rapid inversion model of shallow water[J]. Technical Acoustics, 2012, 31(2):152–155.
- [16] 屈科,胡长青,赵梅.利用传播损失反演海底单参数[J].声学学报, 2013, 38(4):472–476.
Qu K, Hu C Q, Zhao M. Single parameter inversion using transmission loss in shallow water[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2013, 38(4):472–476.
- [17] 屈科,胡长青,赵梅.利用时域波形快速反演海底单参数的方法[J].物理学报, 2013, 62(22):224303.
Qu K, Hu C Q, Zhao M. A rapid inversion scheme for seabed single parameter using time–domain impulse response [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(22):224303.
- [18] 屈科,朱凤芹.基于单参数海底模型的匹配场处理仿真研究[J].广东海洋大学学报, 2017, 37(3): 100–105.
Qu K, Zhu F Q. Simulation research on Matched Field Processing based on the single parameter seabed model [J]. Journal of GuangDong Ocean University, 2017, 37(3): 100–105.
- [19] Porter M B. The matched field processing benchmark problems[J]. Journal of Computational Acoustics, 1994, 02(3): 161–185.

The Application of Simplified Geoacoustic Model in Shallow Sea Focalization

QU Ke, HE Shu-bin, LI Zhang-long

College of Electronics and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong Province, China

Abstract: In order to improve the environmental tolerance of localization algorithm, the focalization includes the environment parameters in the search space. Although the stringent requirement of environment measurement is eliminated, the increase of inversion parameters adds the complexity into the inversion process. Based on the reflection characteristics of sea bottom, two parameters are used to model sea bottom. Using the inversion benchmark problem, the effectiveness of the simplified geoacoustic model in shallow sea focalization has been analyzed. The results show that localization based on the simplified geoacoustic model is feasible. While the correct source location is obtained, the convenience of matching field processing increases with the decrease of the number of geoacoustic parameters. The simplified geoacoustic model introduced in this paper is a geoacoustic model with minimum parameters in focalization problems. It can effectively reduce the number of unknowns in focalization to improve the convenience of inversion. Meanwhile, the simplified geoacoustic model has a certain advantage on the parameter sensitivity and the inter-coupling, which can guarantee the robustness of location result.

Key words: focalization; matched field processing; genetic algorithms; geoacoustic parameter