

基于深海会聚区声强匹配处理的声源定位方法

郭 李, 宋志杰, 王 良

(中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东青岛 266100)

摘要: 匹配场处理技术(Matched Field Processing MFP)近年来在声源被动定位、海洋环境声学参数反演等方面得到广泛的应用。根据深海声道中声场的会聚现象,提出了一种基于深海会聚区声强匹配处理(Matched Convergence Intensity Processing, MCIP)的深海声源定位方法。当声源和接收水听器处在会聚区深度范围内时,MCIP 方法利用单个水听器即可实现声源距离和声源深度估计。对单个水听器的实测信号进行相位补偿到会聚区距离上,得到实测场声强,与拷贝场会聚区声强进行相关计算并搜索峰值来确定声源位置。数值仿真实验验证了 MCIP 方法,并分析了环境失配情况下 MCIP 的估计性能。

关键词: 水声定位; 深海会聚区; 匹配场处理

中图分类号: O42

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-03-0277-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.03.008

A method of sound source localization based on matching the sound intensity in deep-sea convergence zone

GUO Li, SONG Zhi-jie, WANG Liang

(College of information science and eng., Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China)

Abstract: Matched field processing (MFP) is widely used for sound source localization and acoustic parameter inversion of marine environment in recent years. Depending on the convergence zone phenomenon in deep-sea channel, the paper proposes a method of sound source localization based on matched processing of the sound intensity in deep-sea convergence zone. This method is called 'matched convergence intensity processing (MCIP)', which can just rely on a single hydrophone to estimate the distance and depth of the sound source in the case where the source and the receiver are both in the range of convergence zone. The actual intensity can be measured by phase compensation to the signal received by hydrophone. Accordingly the source location can be determined by searching the peak value of the correlation coefficients of the actual sound intensity and the sound intensity in the convergence zone of the copy field. This method is verified by numerical simulation and its applicability in the case of marine environmental mismatch is analyzed.

Key words: acoustic positioning localization; deep-sea convergence zone; matched field processing

0 引言

匹配场处理技术(Matched Field Processing, MFP)近年来在声源被动定位、海洋环境声学参数反演等方面得到广泛应用^[1-5]。MFP 的基本原理是:利用已知的水声环境参数信息,基于声信号的多径传播特点,采用声传播模型来计算拷贝场向量,并与测量信号进行“匹配”来实现求解声源位置参数^[6,7]。现行的 MFP 处理方法或多或少地要求接收传感器在深度方向有一定的孔径^[1,8-10],限制了 MFP 更广泛的应用。

本文提出了一种在深海中利用声场会聚区声

强匹配的目标定位方法(MCIP)。当声源和接收水听器都处在会聚区深度范围内时,对单个水听器的实测信号进行相位补偿到会聚区距离上,得到实测场声强,与拷贝场会聚区声强进行相关计算并搜索峰值来确定声源位置。

1 基本原理

在深海声道中,由于大量简正波相干叠加形成高声强焦散区域,称为会聚区。会聚区内的声能较强,传播过程中衰减较少^[11]。图 1 中所示的高亮区域,表示第一会聚区所在位置,在水平方向上距离声源大约 40~60km 处,这些位置的信号声强较强。而且,当声源深度改变时,会聚区内的声场结构也会发生改变。因此,利用会聚区的声强作为匹配信息时,可能较好地估计出声源的位置,即声源到接

收稿日期: 2011-05-24; 修回日期: 2011-07-19

作者简介: 郭李(1985-),男,山西临汾人,硕士研究生,研究方向为声传播、水声信号处理。

通讯作者: 郭李, E-mail: guoli516304332@126.com

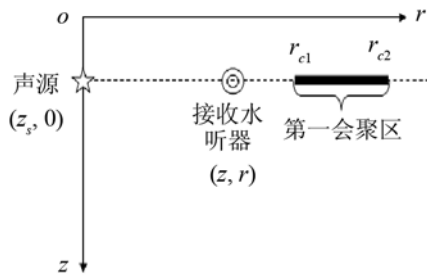


图 1 声场模型示意图
Fig.1 Schematic diagram of the sound field model

收点的距离和声源深度。

如图 1 所示，以第一会聚区为例，假设声源位于 $(z_s, 0)$ 点，接收水听器位于已知的 (z, r) 点。

1.1 拷贝场声强

根据简正波理论，频率为 ω 的简谐波声场可以表示为一系列简正波的叠加：

$$p(r, z, z_s) = \frac{i}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi r}} e^{-i\pi/4} \sum_{m=1}^{\infty} \Psi_m(z_s)\Psi_m(z) \frac{e^{i\nu_m r}}{\sqrt{\nu_m}} \quad (1)$$

式(1)中： $\Psi_m(z)$ 为各号简正波振幅函数； ν_m 为各号简正波水平波数。选取深度为 z_s ，用 r_c 表示会聚区所在的水平距离， r_{c1} 和 r_{c2} 分别表示会聚区起始处、终止处的水平距离，即 $r_c \in (r_{c1}, r_{c2})$ 。由式(1)得到会聚区的声场 $p(r_c, z_0, z_s)$ 为

$$p(r_c, z, z_s) = \frac{i}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi r_c}} e^{-i\pi/4} \sum_{m=1}^{\infty} \Psi_m(z_s)\Psi_m(z) \frac{e^{i\nu_m r_c}}{\sqrt{\nu_m}} \quad (2)$$

进而求得会聚区声强作为拷贝向量：

$$I(r_c, z, z_s) = |p(r_c, z, z_s)|^2 = \frac{1}{\rho(z_s)^2 8\pi r_c} \left[\sum_{m=1}^{\infty} \Psi_m^2(z_s)\Psi_m^2(z) \frac{e^{2i\nu_m r_c}}{\nu_m} + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \Psi_m(z_s)\Psi_n(z_s)\Psi_m(z)\Psi_n(z) \frac{e^{i(\nu_m - \nu_n)r_c}}{\sqrt{\nu_m \nu_n}} \right] \quad (3)$$

声场强度沿距离的分布一般采用传播损失(TL)表示，图 2 中虚线框内为会聚区(拷贝向量)。

1.2 实测声强

如图 1，设接收点到声源距离为 r ，水听器接收的实测声场为 $p_m(t)$ ，由公式(1)可知，距离为 $r+\Delta r$ 的位置的声场可以表示为

$$p(r+\Delta r, z, z_s) = \frac{i}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi(r+\Delta r)}} e^{-i\pi/4} \sum_{m=1}^{\infty} \Psi_m(z_s)\Psi_m(z) \frac{e^{i\nu_m(r+\Delta r)}}{\sqrt{\nu_m}} \quad (4)$$

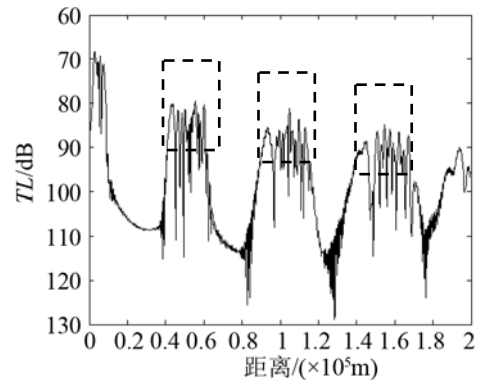


图 2 声场传播损失图
Fig.2 Sound field transmission loss

相位关系满足

$$e^{i\varphi_{r+\Delta r}} = e^{i(\varphi_r + \varphi_{\Delta r})} = e^{i\varphi_r} \cdot e^{i\varphi_{\Delta r}} \quad (5)$$

其中： $\varphi_{r+\Delta r}$ 为 $r+\Delta r$ 处的声场相位； φ_r 为 r 处声场相位； $\varphi_{\Delta r}$ 为两者相位差。利用拷贝场计算出 $p(r+\Delta r, z, z_s)$ 和 $p(r, z, z_s)$ 的声场相位差为

$$\varphi_{\Delta r} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(A)}{\text{Re}(A)} \right) \quad (6)$$

$$A = \frac{p(r+\Delta r, z, z_s) \cdot p^*(r, z, z_s)}{|p(r+\Delta r, z, z_s)| |p(r, z, z_s)|} \quad (7)$$

其中， $p^*(r, z, z_s)$ 表示 $p(r, z, z_s)$ 的共轭。因此，补偿得到会聚区声场为

$$p_{com}(r'_c, z, z_s) = p_m e^{i\varphi_{\Delta r}} \quad (8)$$

进而得到补偿的会聚区声强为

$$I_{com}(r'_c, z, z_s) = |p_{com}(r'_c, z, z_s)|^2 \quad (9)$$

2.3 目标函数

将拷贝场会聚区声强 $I(r_c, z, z_s)$ 和实测场会聚区声强 $I_{com}(r'_c, z, z_s)$ 的相关系数作为目标函数：

$$\rho = \frac{N \sum_{r_{c1}}^{r_{c2}} I_{com} - \sum_{r_{c1}}^{r_{c2}} I \sum_{r_{c1}}^{r_{c2}} I_{com}}{\sqrt{N \sum_{r_{c1}}^{r_{c2}} I^2 - [\sum_{r_{c1}}^{r_{c2}} I]^2} \sqrt{N \sum_{r_{c1}}^{r_{c2}} I_{com}^2 - [\sum_{r_{c1}}^{r_{c2}} I_{com}]^2}} \quad (10)$$

其中： N 代表会聚区内选取的 I 的个数； I 代表 $I(r_c, z, z_s)$ ； I_{com} 代表 $I_{com}(r'_c, z, z_s)$ 。当假设的声源深度 z'_s 与实际声源深度 z_s 相同，并且补偿得到的距离 r'_c 恰好等于真实距离 r_c 时，实测场会聚区声强恰好与拷贝场会聚区声强完全匹配，此时相关系数最大，理想情况下为 1。这样，估计声源位置的问题可以转化为求解目标函数最大值问题：

$$[r_c, z_s] = \text{Max}_{r_c, z_s} [\rho(r_c, z_s)] \quad (11)$$

2.4 算法

下面讨论求解公式(11)的算法，暂不考虑算法的优化问题，而采用穷举法来获得目标函数的分布情况。

水平方向以 100m 为步长, 垂直方向以 10m 为步长, 将海面以下 RoZ 平面进行网格划分。在网格的节点上依次进行扫描, 即对声源深度 z 及水平距离 r 形成的每个网格进行搜索, 找到目标函数最大值, 进而提取峰值的位置。

综上所述, MCIP 方法不需要获得声场的垂直分布信息, 而是利用单个水听器接收的声场在会聚区宽度内的声强-距离分布信息作为匹配量实现定位。因此, MCIP 不受接收器垂直方向的孔径限制。另外, MCIP 是基于会聚区声强匹配的定位方法, 声源和接收深度超出会聚区深度范围的情况不属于本文的讨论范围。

3 MCIP 仿真试验

3.1 定位仿真试验

仿真试验中, 目标声源位于水下深度 900 m, 距离接收阵 30 km 处。海洋环境参数选取: 深海水深为 4000m, 海水密度为 1.03 g/cm^3 。海底参数为: 海底声速为 1623 m/s, 海底密度为 1.6 g/cm^3 , 海底声衰减为 $0.5 \text{ dB}/\lambda$ 。声速剖面如图 3 所示:

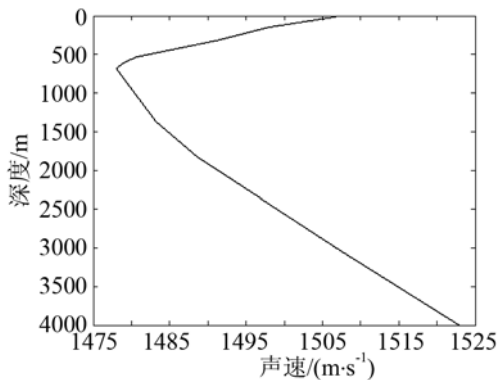


图 3 声速剖面
Fig.3 Sound speed profile

试验具体实现可以分为三个部分: (1) 假设声源位置, 已知接收位置和海洋环境信息, 快速准确计算出声场结构, 取第一会聚区声强作为拷贝场向量; (2) 通过对实测信号进行相位的补偿, 得到会聚区声强作为匹配场向量; (3) 将拷贝场向量和匹配场向量做相关计算, 取得目标函数最大值。

仿真试验中, 在其他海洋环境参数基本不变的情况下, 变换不同的声速剖面进行多次试验, 试验证明 MCIP 声源定位方法结果稳定。图 4~6 为多次仿真实验中的一例。

3.2 失配分析

实际的海洋环境参数及海底参数很难准确获

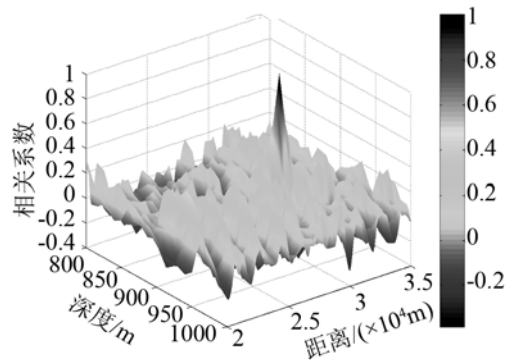


图 4 目标函数随声源位置的变化
Fig.4 The variation of objective function with the location of sound source

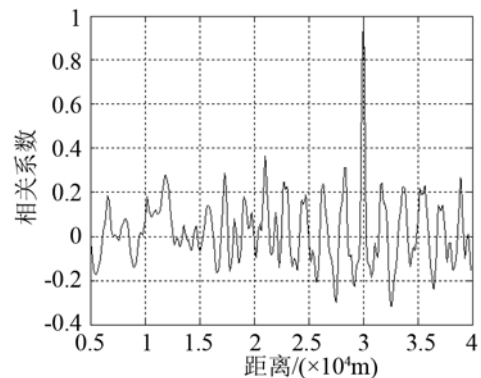


图 5 真实声源深度时目标函数随声源水平位置的变化
Fig.5 The variation of objective function with the horizontal position of sound source when the source depth is true

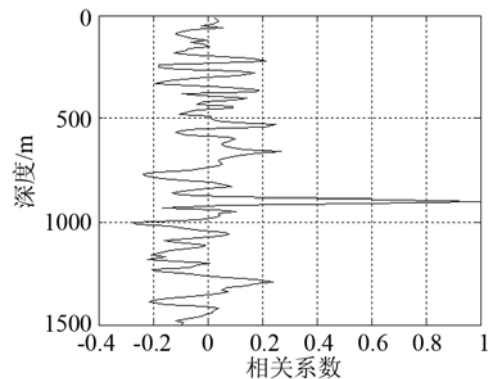


图 6 真实声源水平距离时目标函数随声源深度的变化
Fig.6 The variation of objective function with the source depth when the horizontal position of the source is true

得, 这就使得拷贝场理论值与真实值之间有一定的误差, 这种误差会对匹配场定位造成一定的影响^[11]。本文涉及的是基于深海声道中的声场情况, 故海底参数对声场的影响可以忽略不计。考虑深海中上层水体(200m 以上)声速剖面随季节发生周期性变化, 而下层水体(200m 以下)声速剖面相对稳定。下面讨论上层水体声速剖面发生失配时, 分别对声源位于上层水体和位于下层水体时定位的影响。

这里用真实海表声速和失配时海表声速的差 Δc_s (如图 7 所示) 表征声速剖面的失配程度, 单位

是 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。表 1、2 中, ε 为失配情况下的目标函数信噪比(单位: dB):

$$\varepsilon = 10 \log \left(\frac{\text{Max}[\rho]}{\text{mean}(\rho)} \right) \quad (12)$$

其中: $\text{mean}(\rho)$ 表示目标函数 ρ 的均值。表中, σ 为 MCIP 方法在水平方向所定位置与真实位置的差, 单位是 m。L 表示水平方向网格长度 100 m, D 表示垂直方向网格长度 10m。

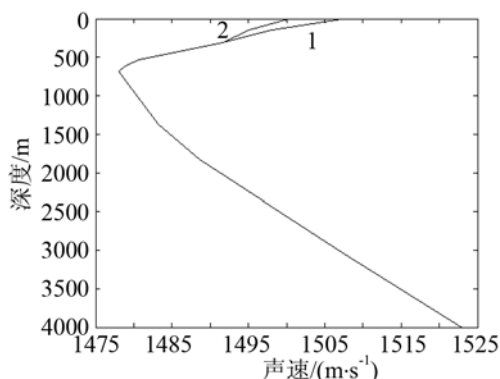


图 7 声速剖面失配(1 号真实声速剖面, 2 号代表失配声速剖面)
Fig.7 Mismatch of sound speed profile (1 is the true sound speed profile. 2 is the mismatched sound speed profile)

表 1 水平距离定位失配误差

Table 1 Error of estimating horizontal distance for the sound velocity profile mismatched

$\Delta c_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	ε/dB	σ/m	$\Delta c_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	ε/dB	σ/m
$z_s=200$			$z_s=900$		
1	50.22	小于 L	1	71.94	小于 L
3	48.12	小于 L	3	68.87	小于 L
5	50.32	小于 2L	5	64.90	小于 L
7	48.04	小于 2L	7	57.47	小于 2L
9	46.67	小于 3L	9	51.51	小于 2L

表 2 深度定位失配误差

Table 2 Error of estimating depth for the sound velocity profile mismatched

$\Delta c_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	ε/dB	σ/m	$\Delta c_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	ε/dB	σ/m
$z_s=200$			$z_s=900$		
1	49.53	小于 D	1	76.16	小于 D
3	50.82	小于 2D	3	67.47	小于 D
5	46.58	小于 2D	5	59.41	小于 D
7	43.74	小于 2D	7	53.79	小于 D
9	41.86	小于 2D	9	52.59	小于 D

从表 1、2 可以看出, 随着 Δc_s 增大, 定位准确率逐渐下降, 目标函数信噪比逐渐降低。不同声源深度下, 对位于下层水体的声源定位效果优于位于上层水体的声源的定位效果。

另外, 试验以 100 Hz 和 500 Hz 的信号为例对频率的失配进行了讨论。实验结果显示: 对于 100 Hz 的信号, 频率误差为 3 Hz 时, 水平方向的定位出现两个网格的偏差(偏离真实位置 200m), 而频率

误差为 5 Hz 时, 水平方向定位出现三个网格的偏差, 表明随着频率误差越大, 失配现象越严重; 而当 100 Hz 信号和 500 Hz 信号出现相同的频率误差 5 Hz 时, 500 Hz 信号水平方向定位仅仅出现一个网格的偏差, 表明信号频率越高, 频率的失配现象越轻微。

4 结 论

本文提出了一种基于会聚区声强匹配的声源定位方法, 通过对单个水听器接收的声场信息进行相位补偿, 得到实测会聚区声强, 与理论计算的拷贝场会聚区声强进行匹配, 从而确定声源的位置(源深和水平距离)。仿真实验表明了 MCIP 声源定位方法的有效性。对于环境的失配, 深海声道中只考虑上层水体声速剖面的失配情况。失配分析实验表明声源位于上层水体时环境失配的影响相对较大。另外, MCIP 声源定位方法对第二、第三等高号会聚区同样适用。接收器可以采用阵列接收, 利用波束形成还可以估计目标方位, 并提高信噪比。本文工作是在不考虑声场初始相位的前提下完成的, 对于考虑初始相位的情况, 还需要更多的参考信息, 这些工作将另文讨论。

参 考 文 献

- [1] 高天赋, 陈耀明, 杨怡青. 短垂直阵筒正弦匹配的声源定位[J]. 声学学报, 1996, 21(4): 493-505.
GAO Tianfu, CHEN Yaoming, YANG Yiqing. Source location by the MMP of a short vertical array[J]. ACTA Acoustic, 1996, 21(4): 493-505.
- [2] 杨坤德, 马远良, 等. 浅海环境参数宽带匹配场反演研究[J]. 声学技术, 2002, 21(3): 150-152.
YANG Kunde, MA Yuanliang. Broadband matched field inversion for shallow water environment parameters[J]. 2002, 21(3): 150-152.
- [3] 贾浩, 陶进绪, 袁韬, 周俊山. 一种用阈值提取子空间的多步匹配场反演方法.(10-2-135)
JA Hao, TAO Jinxu, YUAN Tao, ZHOU Junshhan. A Multi-step matched field inversion approach using a threshold for subspace extration.(10-2-135)
- [4] 马敬广, 李峰. 基于时间反转镜的宽带匹配场处理[J]. 声学技术, 2007, 26(4): 606-610.
MA Jingguang, LI Feng. Broad band matched field processing technique basing on time-reversal[J]. Technical Acoustics. 2007, 26(4): 606-610.
- [5] 邹士新, 杨坤德, 等. 几种优化算法在浅海匹配场反演中的性能比较[J]. 声学技术, 2005, 24(1): 4-9.
ZOU Shixin, YANG Kunde. Performance praparison of optimization algorithms in matched field inversion[J]. Technical Acoustics, 2005, 24(1): 4-9.
- [6] 杨坤德. 水声阵列信号的匹配场处理[M]. 西北工业大学出版社, 2007.
YANG Kunde. Matched field processing of acoustic array signal[M]. Northwestern Polytechnical University, 2007.

- [7] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨工程大学出版社, 1993.
LIU Bosheng, LEI Jiayu. Theory of underwater acoustics[M]. Harbin Engineering University Press. 1993.
- [8] Shoreiy J A, Nolte W, Krolik J L. Computationally efficient Monte Carlo estimation algorithms for matched field processing in uncertain ocean environment[J]. J. Comput. Acoust., 1994, 2(3): 285-314.
- [9] Bucker H P. Use of calculated sound field and matched field detection to locate sound sources in shallow water[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1976, 59(2): 368-373.
- [10] Tolstoy A. Matched field processing for underwater acoustic[M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1993.
- [11] 杨坤德. 水声信号的匹配场处理技术研究[D]. 西北工业大学, 2003.
YANG Kunde. Matched field processing technology of underwater acoustic signal[D]. Northwestern Polytechnical University, 2003

《声学技术》在2011年上海市期刊编校质量检查中获优秀奖

在上海市新闻出版局日前发布的《关于2011年上海开展期刊编辑质量检查情况的通报》中,《声学技术》取得优异成绩,荣获上海市期刊编辑质量优秀奖。

依据《出版管理条例》及《期刊出版管理规定》等相关规定,上海市新闻出版局于2011年4月至11月,对上海期刊开展了编校质量检查工作。检查分为初查、复核、反馈、仲裁等阶段。

本次检查的期刊总数为603种,分为优秀、合格和不合格三种情况。

社科期刊254种,其中优秀刊物84种,约占社科期刊总数的33%,合格刊物118种,约占社科期刊总数的46.5%。不合格刊物52种,约占社科期刊总数的20.5%。

科技期刊349种,其中优秀刊物73种,约占科技期刊总数的21%,《声学技术》名列其中。合格刊物230种,约占科技期刊总数的66%。不合格刊物46种,约占科技期刊总数的13%。

《声学技术》编辑部非常重视编校质量问题,严格按照《出版管理条例规定》,执行编辑责任制和三审三校制。今后,编辑部将再接再厉,牢牢把握正确的舆论导向和价值取向,力求保证所刊文章的科学性和准确性。

