

被动迭代时间反转镜研究

生雪莉, 周伟, 鲍习中, 惠俊英

(哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 抗除多途信道的干扰, 优化被动检测性能是声纳信号处理关注的问题之一。通过仿真揭示了多途信道中单水听器时间反转镜的聚焦效应, 研究了被动迭代时间反转镜技术, 对其多目标定位选择性、多目标选择聚焦性能作了研究。结果表明利用了海洋信道的相干多途特性, 被动时间反转镜可实现多个目标的空间匹配滤波; 利用迭代算法, 被动迭代时间反转镜可在抑制环境噪声干扰的同时, 在信道输出总能量强的目标处实现选择性聚焦。

关键词: 时间反转; 迭代算法; 被动检测

中图分类号: U675.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-04-0588-05

Study on passive iterative time reversal mirror

SHENG Xue-li, ZHOU Wei, BAO Xi-zhong, HUI Jun-ying

(College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Optimizing detection performance of passive sonar is important in sonar signal processing. The focusing effect of the single time reversal mirror (TRM) in multi-path channels is proved by simulation and the technique of passive iterative TRM is studied. The selective focusing and locating of TRM are studied while multi-targets exist. The results show that the passive TRM can realize the multi-targets' space matched-filtering, and combined with iterative algorithm the passive iterative TRM can be focused on the most reflective target and weaken environment noise.

Key words: time reversal mirror; iterative algorithm; passive detection

1 引言

水声信道的介质不均匀性、多途性和时变性是导致水声信号波形畸变的主要原因。研究已经证明, 物理时间反转镜(Time-reversal Mirror, 简称TRM)技术可以不需要介质不均匀性的先验信息, 自适应修正各种多途引起的畸变, 并可以实现自适应聚焦^[1-4]。反转镜时空滤波技术在被动定位领域的应用也得到了初步的探讨^[5], 仿真验证了在典型水文条件下, 被动时间反转镜(Passive Time-reversal Mirror, 简称PTRM)技术可在三维空间获得较高的单目标定位精度, 且有良好的稳健性。

当存在多个目标且具有不同的源强度时, 主动

迭代 TRM 可在强目标上实现最终的聚焦, 本文将迭代算法引入到被动 TRM 技术中, 通过理论和仿真分析验证了被动迭代 TRM 在无须介质不均匀性先验信息的条件下, 对信道输出总能量强的目标的选择聚焦能力。这对被动声纳在噪声背景下提取信号(或提取纯干扰分量)都是有实际意义的。

2 主动迭代时间反转镜的基本原理

首先扼要叙述主动迭代 TRM 的原理。当介质中存在两个或两个以上的散射体, 且具有不同的散射强度时, 通过有限次数的 TRM 迭代就可以最终聚焦在强散射体上。设有两个目标 a 和 b, 它们的散射系数分别为 α 和 β ($\alpha > \beta$), 如图 1(a)所示。传感器阵在发送一个探测波束后接收目标的回波, 该回波是相对强度为 α 的目标 a 的回波和相对强度为 β 的目标 b 的回波的叠加(图 1(b)所示)。再将此回波时反后重发(图 1(c)所示), 再次收到的回波就是相对强度为 α^2 的目标 a 的回波和相对强度为 β^2 的目

收稿日期: 2007-06-05; 修回日期: 2007-08-08

基金项目: 国家重点实验室基金(9140C200305080C20)和预研项目(4010501040104)资助。

作者简介: 生雪莉(1977-), 女, 云南昆明人, 博士, 副教授, 研究方向为水声信号处理、矢量信号处理、水下定位与导航技术。

通讯作者: 生雪莉, E-mail: hrb_lier@yahoo.com.cn

标 b 的回波的叠加,经过 n 次迭代,两个目标回波的相对强度就变为 α^n 和 β^n (图 1(d)所示)。所以只要迭代次数 n 足够大,则 $\alpha^n \gg \beta^n$,系统自动聚焦在目标 a 上。

M. Fink 在超声中进行了这一实验^[6],实验装置及结果如图 2 和图 3 所示,图 3 中黄铜线的散射系数 α_b 大于青铜线的散射系数 α_c 。

图 3(a)所示为两目标一次时反后的聚焦结果,图 3(b)为迭代三次后的时反镜聚焦结果。从实验结果可知,经过迭代后只有散射系数最强的物体能够检测出来,可见主动迭代 TRM 具有选择聚焦的性能。

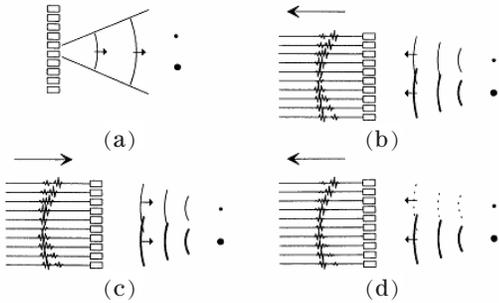


图 1 主动迭代 TRM 的工作原理示意图
Fig.1 Principle of active iterative TRM

3 被动迭代时间反转镜的基本原理

在主动工作方式下,TRM 聚焦定位技术可以通过多次迭代的方法,实现在散射系数大的目标上选择聚焦的目的。把这一思想引入到被动 TRM 聚焦定位中,利用“虚拟反转镜技术”^[7],通过建立信道模型,将被动接收到的目标辐射噪声多次时反“重发”到海洋信道中,最终实现在传播损失小的目标上选择聚焦的目的。

水下声信道是相干多途信道^[8],如图 4 所示,信号 $p_1(t)$ 从声源 $a_{01}(r_{01}, z_{01})$ 传播到接收点 R 处所经过的海洋信道用冲激响应函数 $h_{p1}(\tau, r_{01}, z_{01})$ 表示,信号 $p_2(t)$ 从声源 $a_{02}(r_{02}, z_{02})$ 传播到接收点 R 处所经过的海洋信道用冲激响应函数 $h_{p2}(\tau, r_{02}, z_{02})$ 表示,其中 r_{01}, r_{02} 分别表示两声源的水平距离,以接收机所在位置为坐标原点,且有 $r_{01} > r_{02}$; z_{01} 和 z_{02} 分别表示两声源的垂直坐标。接收到的信号和本地环境干扰叠加成为水听器的输出 $y_p(t)$:

$$y_p(t) = p_1(t) * h_{p1}(\tau, r_{01}, z_{01}) + p_2(t) * h_{p2}(\tau, r_{02}, z_{02}) + n_p(t) \quad (1)$$

上式中的符号“*”表示卷积。依据实测得到的海洋声速分布、海区深度及海底声学特性,对信道建模^[9],得到 R 点到海洋中各点 $a_i(r_i, z_i)$ (其中包含 a_{01} 点和 a_{02} 点)间的信道 $h_p(\tau, r_i, z_i)$,将 $y_p(t)$ 时反后再通过信道 $h_p(\tau, r_i, z_i)$ (这一过程在信道模型中进行),得到一个输出 $z_p(t, r_i, z_i)$,这相当于虚拟将信号与本地噪声在时间上反转后再次发送到“海洋”中,在不同点接收。

$$\begin{aligned} z_p(t, r_i, z_i) &= y_p(-t) * h_p(\tau, r_i, z_i) \\ &= p_1(-t) * h_{p1}(-\tau, r_{01}, z_{01}) * h_p(\tau, r_i, z_i) + \\ &\quad p_2(-t) * h_{p2}(-\tau, r_{02}, z_{02}) * h_p(\tau, r_i, z_i) + \\ &\quad n_p(-t) * h_p(\tau, r_i, z_i) \\ &= p_1(-t) * R_p(\zeta, \rho_1, Z_1) + \\ &\quad p_2(-t) * R_p(\zeta, \rho_2, Z_2) + \\ &\quad n_p(-t) * h_p(\tau, r_i, z_i) \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $R_p(\zeta, \rho_1, Z_1)$ 表示 $h_p(\tau, r_{01}, z_{01})$ 和 $h_p(\tau, r_i, z_i)$ 的相关函数, $\rho_1 = r_{01} - r_i, Z_1 = z_{01} - z_i$; $R_p(\zeta, \rho_2, Z_2)$ 表示 $h_p(\tau, r_{02}, z_{02})$ 和 $h_p(\tau, r_i, z_i)$ 的相关函数, $\rho_2 = r_{02} - r_i, Z_2 = z_{02} - z_i$ 。 $y_p(t)$ 中的信号分量经过两次卷积,即两次通过信道,当 $r_i = r_{01}, z_i = z_{01}$,则 $R_p(\zeta, \rho_1, Z_1) = R_p(\zeta, 0, 0)$,这时 TRM 实现信道的空间匹配,空间增益达到最大值,即在声源 $a_{01}(r_{01}, z_{01})$ 处可形成能量聚焦峰。同理,当 $r_i = r_{02}, z_i = z_{02}$ 时可在声源 $a_{02}(r_{02}, z_{02})$ 处形成能

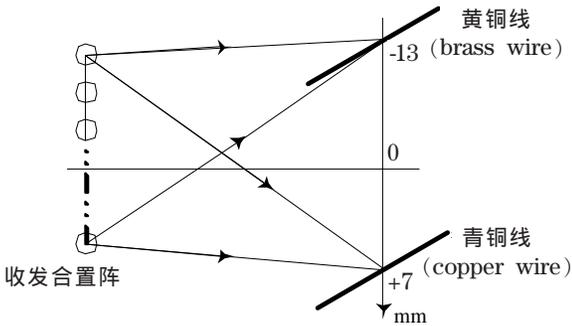


图 2 主动迭代 TRM 的实验装置图
Fig.2 Experimental setting of active iterative TRM

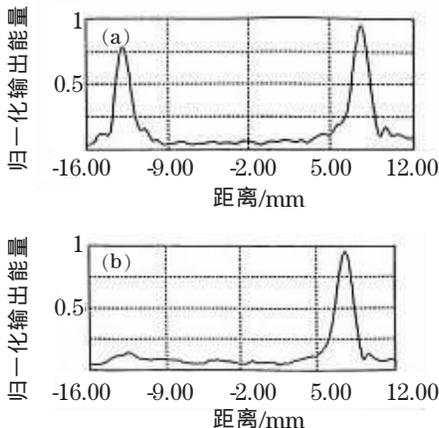


图 3 主动迭代 TRM 的实验结果图
Fig.3 Experimental results of active iterative TRM

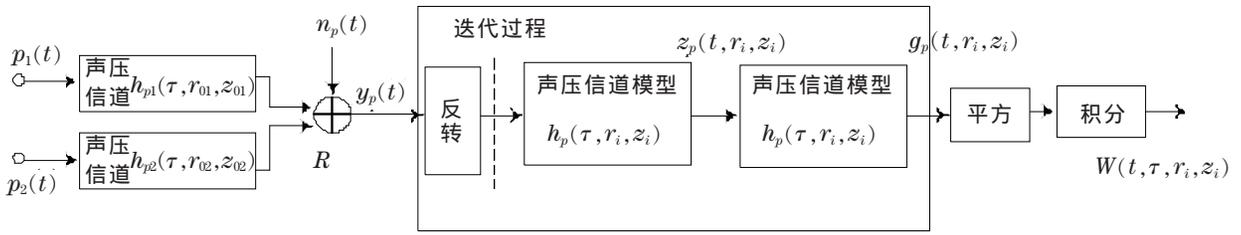


图4 被动迭代 TRM 原理框图
Fig.4 Principle of passive iterative TRM

量聚焦峰,而在其它各点空间增益小。

以上是多目标存在时虚拟 TRM 实现信号空间匹配、取得增益的原理,下面将讨论虚拟时反镜如何在其中一个目标上实现选择聚焦的问题。

运用迭代的方法,当信号迭代一次时,则 $z_p(t, r_i, z_i)$ 再次经过海洋多途信道 $h_p(\tau, r_i, z_i)$, 即表示时反虚拟发送到海洋中的信号 $z_p(t, r_i, z_i)$, 在不同位置 (r_i, z_i) 被散射后在接收点 R 处接收, 因是被动工作方式, 无从知道包括目标在内的散射体的散射系数, 这里假定散射体散射系数均为 1, 这时接收机的输出信号为 $g_p(t, r_i, z_i) = z_p(t, r_i, z_i) * h_p(\tau, r_i, z_i)$ 。经时反后再次通计算机中的模拟信道 $h_p(\tau, r_j, z_j)$ (这相当于二次反转后再次发送到海洋中, 在不同点接收), 得到输出 $z_{p1}(t, r_j, z_j)$ 为:

$$\begin{aligned} z_{p1}(t, r_j, z_j) &= g_p(-t, r_i, z_i) * h_p(\tau, r_j, z_j) \\ &= z_p(-t, r_i, z_i) * h_p(-\tau, r_i, z_i) * h_p(\tau, r_j, z_j) \\ &= p_1(t) * [h_{p1}(\tau, r_{01}, z_{01}) * h_p(-\tau, r_i, z_i) * \\ &\quad h_p(-\tau, r_i, z_i) * h_p(\tau, r_j, z_j)] + p_2(t) * \\ &\quad [h_{p2}(\tau, r_{02}, z_{02}) * h_p(-\tau, r_i, z_i) * \\ &\quad h_p(-\tau, r_i, z_i) * h_p(\tau, r_j, z_j)] + n_p(t) * \\ &\quad h_p(-\tau, r_i, z_i) * h_p(-\tau, r_i, z_i) * h_p(\tau, r_j, z_j) \end{aligned} \quad (3)$$

当迭代到第 k 次时:

$$\begin{aligned} z_{p1}(t, r_j, z_j) &= p_1(t) * [h_{p1}(\tau, r_{01}, z_{01}) * h_p(-\tau, r_i, z_i)] * \\ &\quad [h_p(-\tau, r_i, z_i) * h_p(\tau, r_j, z_j)] \cdots * \\ &\quad [h_p(-\tau, r_i, z_i) * h_p(\tau, r_k, z_k)] + p_2(t) * \\ &\quad [h_{p2}(\tau, r_{02}, z_{02}) * h_p(-\tau, r_i, z_i)] * \\ &\quad [h_p(-\tau, r_i, z_i) * h_p(\tau, r_j, z_j)] \cdots * \\ &\quad [h_p(-\tau, r_i, z_i) * h_p(\tau, r_k, z_k)] + n_p(t) * \\ &\quad h_p(-\tau, r_i, z_i) * [h_p(-\tau, r_i, z_i) * h_p(\tau, r_j, z_j)] \cdots * \\ &\quad [h_p(-\tau, r_i, z_i) * h_p(\tau, r_k, z_k)] \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)可知, 在第 n 次迭代中, 信号分量中有 $2(n+1)$ 个信道分量相卷积, 噪声中有 $(2n+1)$ 个信道分量相卷积。当 n 为奇数时 p_1, p_2 中的时间为正, 当 n 为偶数时 p_1, p_2 中的时间为负, 因在检测时用信号能量来判别, 故并不影响, 以后将其统一写成 $p_1(t)$ 、

$p_2(t)$ 。与上述多目标虚拟反转镜聚焦理论相同, 同样当 $r_i=r_j=\dots=r_k=r_{01}, z_i=z_j=\dots=z_k=z_{01}$ 时, 时反镜输出在声源 $a_{01}(r_{01}, z_{01})$ 处形成聚焦峰, 峰值大小 I_{01} 与信道 $h_p(\tau, r_{01}, z_{01})$ 决定的到达目标处各本征声线的能量和(简称为信道输出总能量, 下同) E_{01} 的 $2(n+1)$ 次方成正比; 当 $r_i=r_j=\dots=r_k=r_{02}, z_i=z_j=\dots=z_k=z_{02}$ 时, 时反镜输出在声源 $a_{02}(r_{02}, z_{02})$ 处形成聚焦峰, 峰值大小 I_{02} 与信道 $h_p(\tau, r_{02}, z_{02})$ 输出的总能量 E_{02} 的 $2(n+1)$ 次方成正比。假设两声源强度相同, $E_{01} > E_{02}$, 经 n 次迭代后, $I_{01} \gg I_{02}$, 即虚拟时反镜在信道输出总能量强的目标上实现了选择聚焦。这种选择聚焦性在声源 a_{02} 的辐射强度略大于 a_{01} 的辐射强度时仍然有效。

图 5 示出声源 $a_{01}(r_{01}, z_{01})$ 和 $a_{02}(r_{02}, z_{02})$ 对应的信道冲激响应函数, 图 6 示出了迭代前后, 信道匹配与不匹配时被动迭代 TRM 相关输出的结果, 其中相关峰即表示被动时反镜对相应信道输出的总能量。

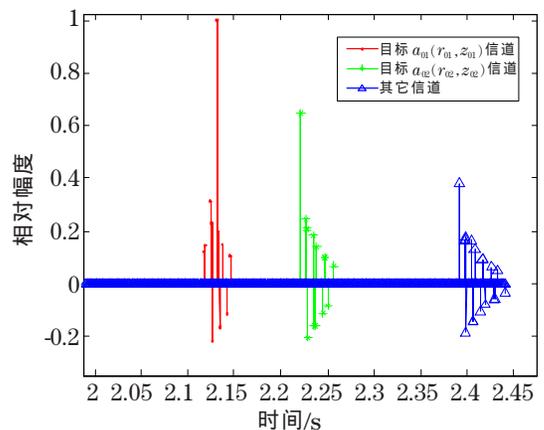


图5 声源 $a_{01}(r_{01}, z_{01})$ 和 $a_{02}(r_{02}, z_{02})$ 对应信道的冲激响应函数

Fig.5 Impulse response function of channel

由图 6 中可知, TRM 可以在各目标位置处聚焦, 随着迭代次数的增加最终在信道输出的总能量强的目标处实现选择性聚焦, 同时, 该算法可以加强 TRM 的聚焦效果, 增强聚焦点的能量, 削弱非聚焦点的能量输出。

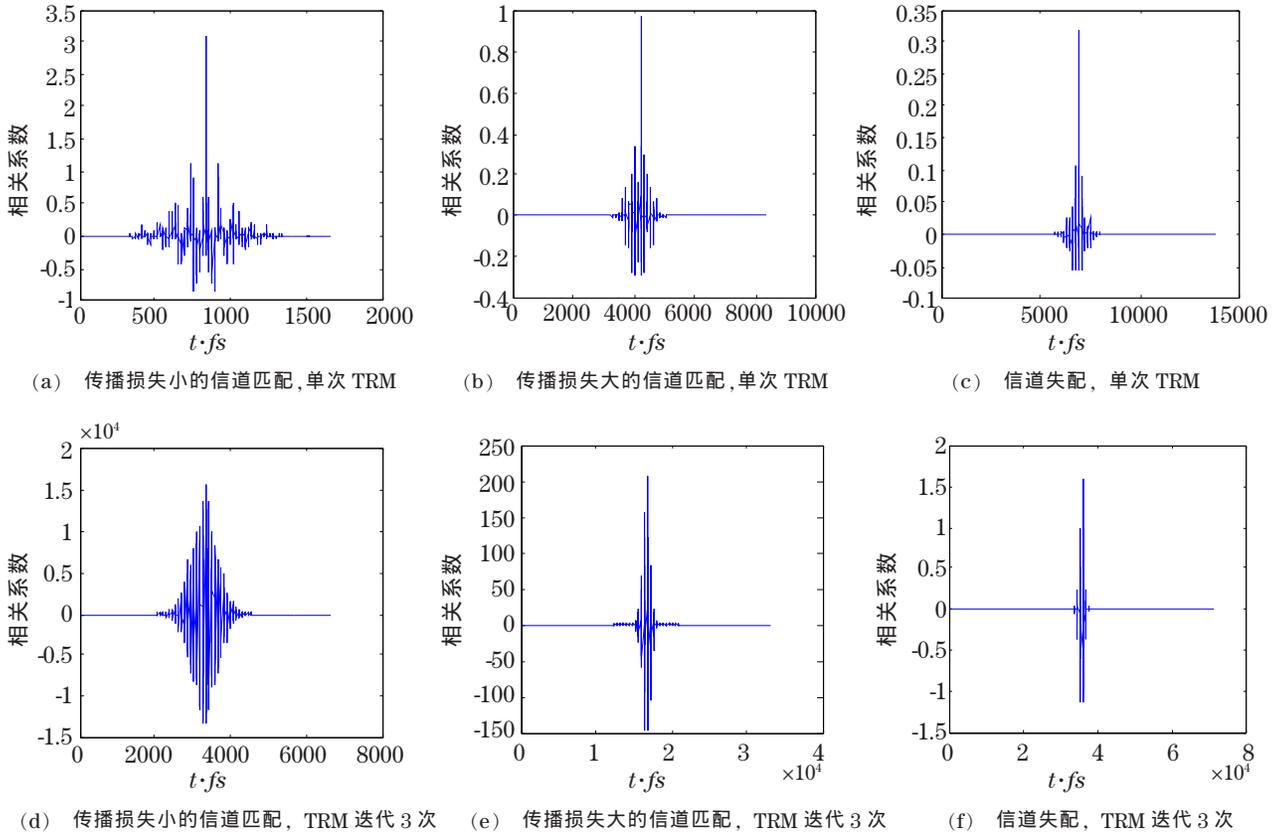


图 6 TRN 迭代对信道输出的影响

Fig.6 Effect of TRN iterative on channel output

4 被动迭代时间反转镜仿真分析

基于图 4,在图 7 中给出了被动虚拟迭代 TRM 仿真研究框图。其声源 A 位置 $a_{01}(r_{01}, z_{01})=a_{01}(820, 20)$, 声源 B 位置 $a_{02}(r_{02}, z_{02})=a_{02}(1120, 20)$, 单位:m(下同);二者均为目标辐射的噪声,且 B 的源强度要强于 A 的源强度;源信号 $p_1(t)$ 和 $p_2(t)$ 均为平稳的高斯噪声;声速分布如图 8 所示,假设信道建模用的声速分布与真实的声速分布相同;接收信号与本地干扰叠加后通过滤波器 H ,滤波器带宽为 2kHz~7kHz;滤波器输出端的信号与干扰的功率比作为信噪比

SNR,仿真中取 $SNR=-7dB$;观测点 $a_i(r_i, h_i)$,其中 $h_i=20m, r_i$ 从 800m 变化到 1200m,间隔为 5m。仿真中用本征声线的方法建立海洋声压信道模型^[9]。仿真结果如图 9 所示。

由图 9(a)中可知,声源 B 辐射噪声的源级强于声源 A(接收信号 A 强于 B 是因 A 处传播损失小),随着迭代次数的增加,B 聚焦峰的相对能量逐渐减弱(见图 9(b)),当迭代次数足够多时,被动迭代 TRM 将完全选择聚焦在声源 A 的位置(见图9(c)),同时可以看到,在迭代过程中,环境噪声随着迭代次数的增加而减小,再次证明了 TRM 仅在目标位置实现聚焦的特性。

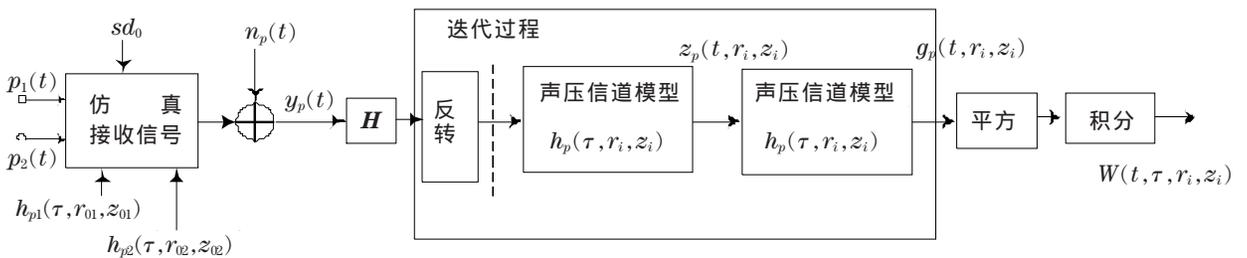


图 7 被动虚拟迭代 TRM 仿真研究框图

Fig.7 Block diagram of passive dummy iterative TRM

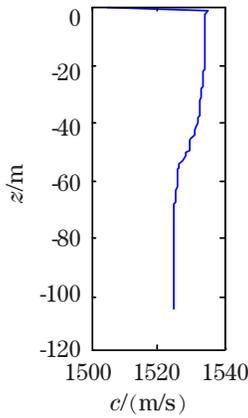
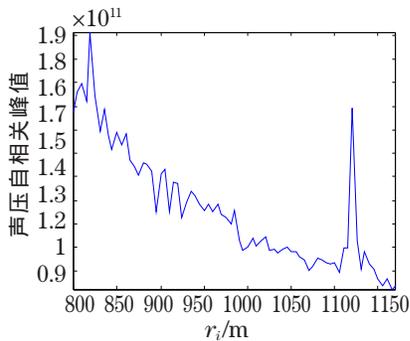
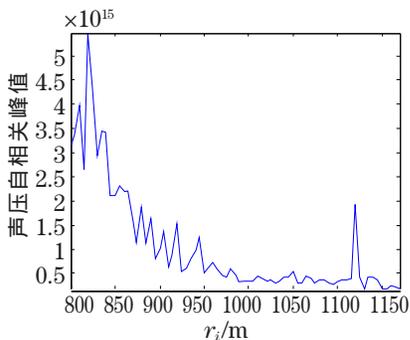


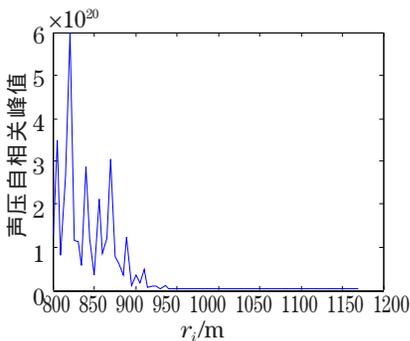
图8 实测声速分布
Fig.8 Profile of sound speed



(a) 迭代前声压反转镜处理结果



(b) 迭代3次声压反转镜处理结果



(c) 迭代7次声压反转镜处理结果

图9 被动迭代 TRM 仿真结果
Fig.9 Simulation of passive iterative TRM

5 结 论

本文在分析了主动 TRM 选择聚焦特性的基础上,将虚拟 TRM 技术和迭代算法相结合,对被动虚拟迭代时反镜的目标聚焦特性、选择聚焦能力进行了研究。

本文阐述了被动迭代 TRM 的基本原理,给出了被动迭代 TRM 多目标定位和选择性聚焦的射线理论解释。在典型的水文条件下,仿真验证了被动迭代 TRM 的选择性聚焦性能,仿真结果表明,当信噪比 $SNR=-7\text{dB}$ 时,该算法仍然能在两个声源位置实现聚焦,且通过迭代算法最终实现对传播损失小的目标的选择聚焦。

参 考 文 献

- [1] Fink M, Prada C, Wu F, Cassereau D. Self focusing in inhomogeneous media with "time reversal" acoustic mirrors, Proc[J]. IEEE Ultrason Symp, 1989, **2**: 681-686.
- [2] Fink M. Time reversal of ultrasonic fields. . Basic principles[J]. IEEE Trans. Ultrason, Ferroelectr. Freq. Control, 1992, **39**: 555-566.
- [3] Parvulescu A, Clay C S. Reproducibility of signal retransmissions in the ocean[J]. Radio Elec. Eng, 1965, **29**: 223-228.
- [4] Kuperman, Hodgkiss W S, Song H C, Akal T, Ferla C, Jackson D R. Phase conjugation in the ocean: Experimental demonstration of a time reversal mirror[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1998, **103**: 25-40.
- [5] 生雪莉, 惠俊英, 梁国龙. 时间反转镜用于被动检测技术的研究[J]. 应用声学, 2005, **24**(6): 351-358.
SHENG Xueli, HUI Junying, LIANG Guolong. Study on passive detecting technology based on an acoustic time-reversal mirror[J]. Applied Acoustics, 2005, **24**(6): 351-358.
- [6] Parvulescu A, Clay C S. Reproducibility of signal retransmissions in the ocean[J]. Radio Elec. Eng, 1965, **29**: 223-228.
- [7] 生雪莉, 惠俊英, 梁国龙. 矢量反转镜时空滤波技术研究[J]. 声学学报, 2005, **30**(3): 271-278.
SHENG Xueli, HUI Junying, LIANG Guolong. Study on spacetime filtering technology based on an acoustic vector time-reversal mirror[J]. ACTA ACUSTICA, 2005, **30**(3): 271-278.
- [8] 惠俊英. 水下声信道(第2版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 37-40.
HUI junying. Underwater acoustic (Second edition) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. 37-40
- [9] 范敏毅. 水下声信道的仿真与应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2000.
FAN Minyi. Simulation and application of under water channel[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2000.