浅海波导中垂直时反线阵聚焦研究

陈 羽，杨鹏飞，王 伟，倪 明
(国防科学与技术大学光电工程学院，长沙 410073)

摘要：在浅海波导中，垂直阵可以跨越整个波导，并能对大多数简正波模态进行精确采样。在给定声源及海洋环境信息的条件下，通过 MOATL 简正波模型仿真计算出到达垂直时反阵位置处的波形，即垂直时反阵的接收信号，将接收信号时间上取反，通过以 KRAKEN 简正波模型计算得出的返回声信道，在声源处取得了较好的聚焦效果。并分析了垂直阵基元数、基元间隔以及发射信号频宽的变化对时反聚焦效果造成的影响。得出适当增大基元数、基元间隔以及发射信号频宽能改善时反聚焦效果的结论。

关键词：垂直阵；简正波；时间反转
中图分类号：TB556 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2011)-01-0041-05
DOI 编码：10.3969/j.issn1000-3630.2011.01.007

Research on vertical linear time-reversing array retrofocusing in shallow water

CHEN Yu, YANG Peng-fei, WANG Wei, NI Ming
(*Institute of Photoelectricity Engineering, National University of Defence Technology, Changsha* 410073, *China*)

Abstract: Vertical linear array can span the whole wave-guide and can sample most normal modes accurately in the shallow water wave-guide. This paper introduces a method that is using MOATL normal mode to simulate a signal in the place of vertical linear array as its take-over signal. Then reverse this signal and make it pass through the reverse wave channel modeled by KRAKEN normal mode. Obvious retrofocusing effects can be seen in the place of sound source. Then the paper analyses how retrofocusing effect changes when the sensor number, the distance between sensors, and the width of source wave frequency alter. Finally it concludes that augmenting the sensor number, the distance between sensors, and the width of source wave frequency properly can improve the time-reversal retrofocusing effect.

Key words: vertical linear array; normal mode; time-reversal

1 引 言

理想的信道能无畸变地传递信息。但海洋的多途效应和介质的不均匀性会使接收信号时域特性畸变(时延扩展)、振幅和相位起伏(频率扩展)[1]。为了克服声学不均匀介质中的波形畸变，在声学中引用了源于光学中不均匀介质的相位共轭成像法[2]，并将连续波的相位共轭法发展为时间反转法。

1991 年，Dowling 对 TRM(Time Reversal Mirror)应用于水声作了定义和基本理论分析[3]。1996 年 4 月，Kupermam 等人在地中海进行了首次时反镜浅海试验。实验结果证明了海洋中的时反聚焦性能[4]。

在浅海波导中，垂直阵能对大多数简正波模态进行精确采样[5]。本文采用计算机仿真分析法，将垂直阵作为收发合置的时反阵，用 MOATL 模型计算模拟出时反阵接收信号，用 KRAKEN 模型[6]计算时反处理后的声信号经过的声压信道，进行时反运算并对影响垂直时反阵聚焦性能的因素进行了分析讨论。

2 时反技术的基本原理

时反(频域里称作相共轭)是指接收阵接收到声源发射的时域信号后，将其时间上取反，再从相应的发射传感器发射出去，即先到后发，后到先发。它是声互易性原理的应用之一，可以使能量在空间和时间上得到聚焦。

2.1 垂直时反阵工作原理

垂直线阵实现时反聚焦的基本装置如图 1 所示。PS 为发射原始信号的探针声源。SRA 为 N 基元收发合置垂直时反阵，用来接收 PS 发射的信号，并对其做时反处理后重新发射。VRA 是垂直接收阵，

收稿日期: 2010-01-26; **修回日期**: 2010-03-28
作者简介: 陈羽(1985-)，男，江苏人，硕士研究生，研究方向为水声信号处理。
通讯作者: 陈羽, E-mail: chenyulm@163.com

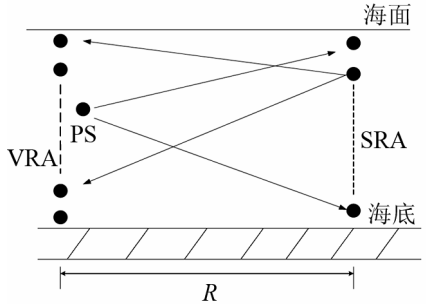


图 1 垂直时反阵示意图

Fig.1 The sketch map of vertical line time-reversal array

与声源处于同一水平距离处，用来接收 SRA 产生的时反声场，以观测探针声源位置处的聚焦情况。

在小振幅振动假设条件下，由流体的连续性方程、状态方程和欧拉方程可以推导出理想流体中线性齐次波动方程为：

$$\nabla^2 p-\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}=0 \tag{1}$$

式中 p 为声压，c 为声速，∇^2 为拉普拉斯算子。

在稳定的简谐声源产生的稳态声场中，波动方程(1)简化为：

$$\nabla^2 p+k^2 p=0 \tag{2}$$

式中，$k=\omega/c$ 为波数。

简正波解是波动方程的一种精确的积分解，适合于浅海信道分析，它通常假定海洋介质为柱面对称的分层介质，将波动方程的解分离成距离函数和深度函数，即：

$$p(r,z)=\phi(r)\cdot\varphi(z) \tag{3}$$

式中，r 是距离，z 是深度。

将式(3)代入声压方程可得独立的深度方程即简正波方程：

$$\frac{\mathrm{d}^2\psi(z)}{\mathrm{d}z^2}+(k^2-\xi^2)\varphi(z)=0 \tag{4}$$

式中，ξ 是分离常数。式(4)的解可归结为特征值问题，它的解为格林函数。

若探针声源(0, z_s)发射单位强度、频率为 ω 的简谐信号，到达 SRA 第 j 个基元(R, z_j)处信号为 $s_j(t)$。在水平分层的海洋环境中，当满足远场条件时，由声源(0, z_j)到(r, z)的声场系统函数(或称格林函数)为：

$$G_j(r,z;0,z_j)=\frac{\mathrm{i}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\pi/4}}{\rho(z_j)\sqrt{8\pi r}}\sum_{m=1}^{\infty}\varphi_m(z_j)\varphi_m(z)\times\frac{\mathrm{e}^{\mathrm{i}k_{rm}r}}{\sqrt{k_{rm}}} \tag{5}$$

式(5)中 φ_m 和 k_{rm} 分别表示各号简正波模函数和水平波数。

$S_j^*(\omega)$ 为第 j 个基元接收信号频域内取复共轭，则第 j 个基元发射的时反信号在(r, z)处产生的声压函数为：

$$P_j(r,z;0,z_j)=G_j(r,z;0,z_j)S^*(\omega) \tag{6}$$

整个 SRA 时反阵在(r, z)处产生的声压函数为：

$$P(r,z;0,z_j)=\sum_{j=1}^{N}G_j(r,z;0,z_j)S^*(\omega) \tag{7}$$

由时反聚焦原理可知：当式(5)所描述的声信道与声源发射信号到达时反阵所经过的信道匹配时，则垂直时反阵可实现在声源处的能量聚焦。

2.2 时反阵聚焦性能的评估标准

为定量分析聚焦性能，引入聚焦点最大声压级 SL 和聚焦点聚焦增益 G 两个参量。

声压级定义为：

$$SL=20\lg\frac{p(r,t)}{p_{ref}} \tag{8}$$

$p(r,t)$ 表示信道某点的声压；$p_{ref}=1\times10^{-6}\mathrm{Pa}$，表示水声信道的参考声压。声压级反映了时反聚焦点处聚焦能量的大小。

聚焦增益定义为：

$$G=20\lg\frac{p^{TR}(r,t)\big|_{\max}}{p(r,t)\big|_{\max}}$$

其中：$p^{TR}(r,t)\big|_{\max}$ 表示时反处理后，声源处接收到的声压最大值。$p(r,t)\big|_{\max}$ 表示未经过时反处理后，声源处接收到的声压最大值。

聚焦增益越大，说明时反前后声压振幅变化越大，在一定程度上说明时反阵聚焦性能好。

3 仿真验证及分析

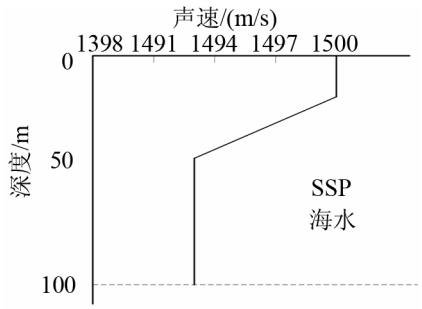
3.1 仿真条件

假设海洋环境不随时间变化，不考虑噪声影响，且假设探针声源和垂直时反阵位于同一垂直剖面内。海水表面为压力释放边界，海底近似为平坦海底。声速剖面及海底参数分别如图 2(a)及图 2(b)所示。其中沉积层与基底密度为 $\rho=1.75\mathrm{g/cm^3}$，衰减系数 $\alpha=0.35\mathrm{dB}/\lambda$。

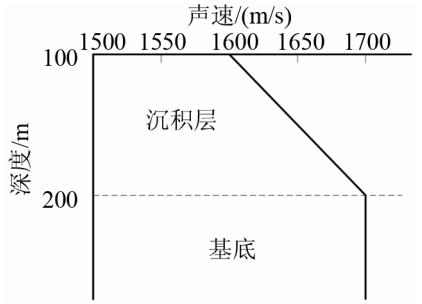
3.3 时反阵接收信号的仿真

MOATL 是一种优良的简正波声场计算程序，利用差分法求解波动方程及其边界条件所对应的本征值及本征函数问题，对一般声速分布的海洋都适用。

在上述海洋环境下，假定探针声源位于(0,30m)处，声源是一个 δ 脉冲经过 950~1050Hz 带宽的 4 阶 Butterworth 滤波后的信号。运用 MOATL 模型计算出距离探针声源 10km、深度为 10m 处的接收器接收信号如图 3 所示。



(a) 声速剖面图



(b) 海底参数模型

图 2　浅海典型声速剖面和海底参数

Fig.2　Typical SSP and sea-bottom parameters of shallow water

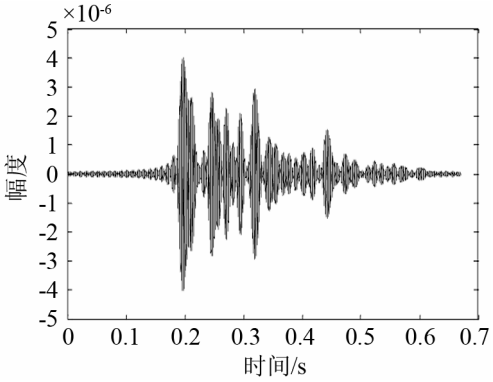


图 3　接收信号

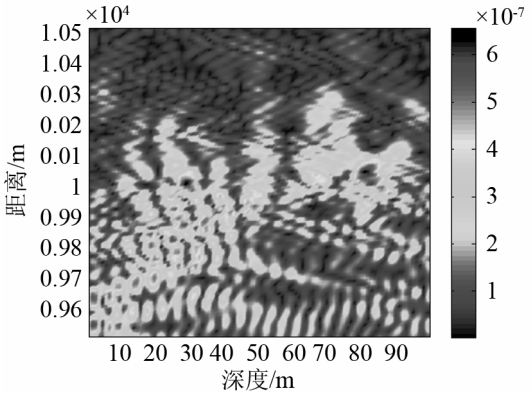
Fig.3　The receiving signal

3.3　时反仿真及结果分析

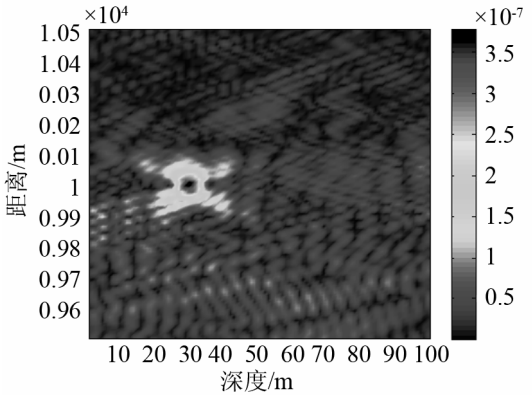
声源为一窄带信号，中心频率为 500Hz，带宽为 10Hz。声源深度为 30m，与垂直时反阵 SRA 水平距离为 10km，SRA 由等间隔基元构成，从海面一直延伸至海底。

利用 KRAKEN 简正波模型分别计算 2 基元与 10 基元时，探针声源附近 0.5km 范围内的时反声压场，水平方向搜索步距为 10m，深度方向搜索步距为 1m。由式(3)计算得到水平 9.5~10.5km 范围内的时反声压场表面模糊度图，如图 4 所示。

由图 4 可以直观地看出，当阵元数为 2 时，时反聚效果不明显，旁瓣影响较大且聚焦点模糊，无法分辨出聚焦点位置。10 阵元情况下，聚焦点能明显分辨出，聚焦位置在声源位置(10000m，30m)附近，聚焦点覆盖范围水平方向约为 100m，深度方向约为 4m，且旁瓣得到了很好的抑制。这也验证了 Kraken 和 Moatl 两种简正波模型所建立的信道是高度匹配的。



(a) 2 基元时反声压场表面模糊度图



(b) 10 基元时反声压场表面模糊度图

图 4　时反聚焦声场(2 基元和 10 基元)

Fig.4　The retrofocusing map of time-reversing for 2 and 10 elements

为进一步研究阵元数增加对时反聚焦效果的影响，表 1 给出了不同阵元数目的情况下，声源处的聚焦增益和最大声压级。

表 1　不同阵元数时的聚焦增益和声压级

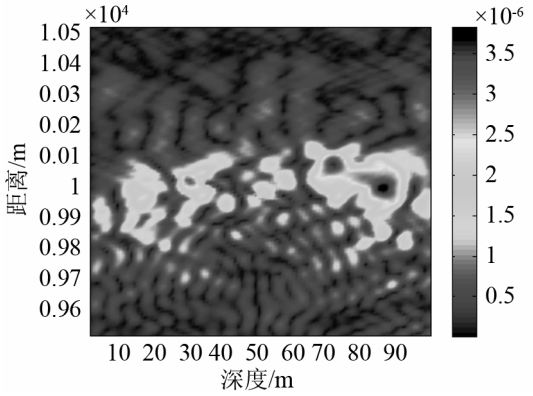
Table 1　The pluses of retrofocusing and sound pressure levels for different sensor numbers

阵元数	最大声压级/dB	聚焦增益/dB
1	−93.4148	1.7473
2	−84.3885	3.8945
5	−76.3995	3.7702
10	−68.4721	6.6806
20	−63.3169	14.3209
40	−57.3705	13.1969
100	−49.4369	13.1589

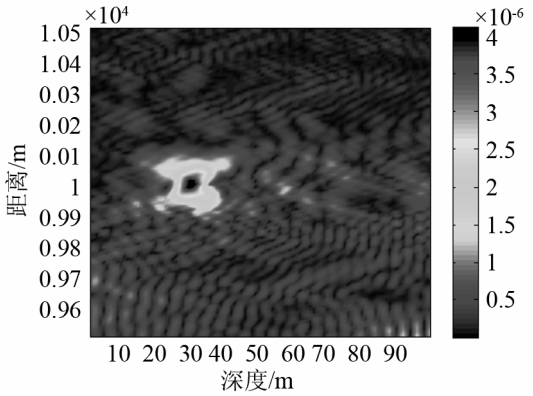
由表 1 可知，时反阵阵元越多，聚焦信号的最大声压级越大，这是因为阵元越多，接收到的多途信号越多，因此相干叠加后聚焦信号能量越大。阵增益并非完全与阵元数目成正比，因为浅海信道声速分布不均匀，导致时反阵所在平面上声能分布不

均匀的缘故造成，且当阵元数大于 20 时，聚焦增益已无明显提高。因而适当增加垂直时反阵阵元数可以改善时反聚焦效果。

以上条件设置不变，若时反基阵阵中心深度为 50m，当阵元数一定时，改变 d/λ 的值(d 为基元间距，λ 为波长)，观察时反聚焦效果的变化，取中心频率 f=500Hz，计算出波长为 3m，分别计算阵元间隔为 1m 和 6m 两种情况，如图 5 所示。



(a) 基元间隔 1m 时反声压场表面模糊度图



(b) 基元间隔 6 米时反声压场表面模糊度图

图 5 时反聚焦声场(阵元间隔 1 米和 6 米)

Fig.5 The retrofocusing map of time-reversing for element separation of 1m and 6m

表 2 给出了 d/λ 改变的情况下，声源处的聚焦增益和最大声压级。

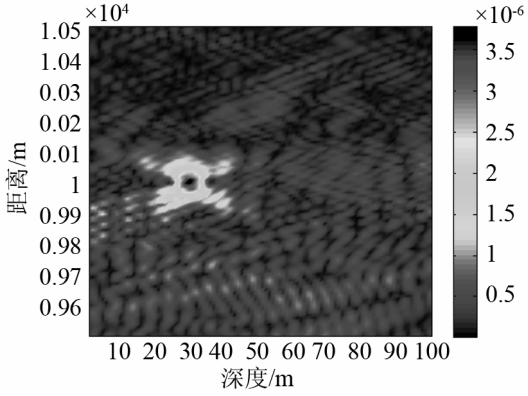
表 2 不同阵元间距时的聚焦增益和声压级

Table 2 The pluses of retrofocusing and sound pressure levels for different sensor distances

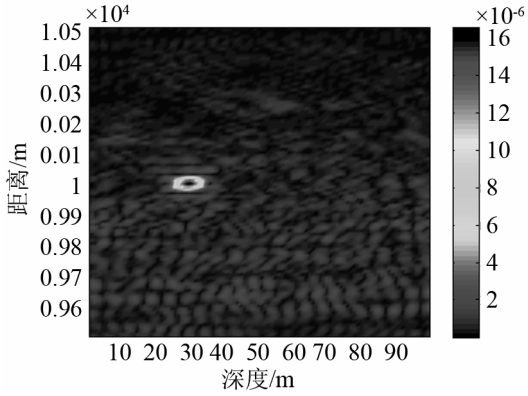
d/λ	最大声压级/dB	聚焦增益/dB
0.33	−70.2476	4.0063
1	−70.7241	5.0283
2	−67.8464	8.8325
3	−68.5368	11.5492

由以上时反聚焦声场图及表中数据对比可知，当 d/λ 较小时，时反后的能量分布比较分散，声源以外的区域能量较多，难以分辨聚焦点的位置，聚焦效果不好，d/λ 较大时，时反后的能量分布较集中，声源处的能量明显高于其它区域，旁瓣得到了很好地抑制，聚焦性能较好，因此当阵元数一定时，适当增大阵元间距与波长的比值可以改善时反聚焦效果。

最后讨论一下发射信号频宽对聚焦效果的影响，当声源发射信号中心频率为 500Hz，分别计算频宽为 10Hz 和 50Hz 时，时反声压场表面模糊度图，如图 6 所示。



(a) 声源带宽为 10Hz 时反声压场表面模糊度图



(b) 声源带宽为 50Hz 时反声压场表面模糊度图

图 6 时反聚焦声场(声源带宽 10 和 50 赫兹)

Fig.6 The retrofocusing map of time-reversing for source frequency band of 10 and 50 Hz

由图 6 可知，当发射信号带宽为 10Hz 时，可以明显地分辨出时反聚焦位置，当发射信号频宽增大至 50Hz 时，聚焦点变小，聚焦精度提高。因此适当增大发射信号频宽可以改善时反聚焦性能。

4 结 论

本文采用两种不同的声场计算模型分别对来回两个声信道建模，仿真计算结果表明：(1) 基阵阵元数目变大，聚焦性能得到提升，当基阵数满足垂直方向充分采样时，则继续提高阵元数聚焦性能无明显改善。(2) 阵元数一定，增大基元间距能改善时反阵聚焦性能。(3) 时反处理时，可采用适当增

大频宽的信号作为发射信号。以上理论可用于分析垂直时反阵主动、被动两种工作方式下的时反聚焦性能，可对垂直时反阵实际应用中如何取得好的聚焦性能提供一定的参考。

在实际应用中，垂直阵有不宜安装、不能运动且易遭破坏等缺点。下一步工作将是对水平线阵的时反聚焦性能仿真，并将进行光纤水听器水平阵被动时反实验，完成实验数据处理与结果分析工作，以完善水平阵时反聚焦理论。

参　考　文　献

[1] 惠俊英. 水下声信道(第 2 版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 67-69.
HUI Junying. The underwater acoustic channel[M]. BeiJing: Industry Press of National Defense, 2007, 67-69.

[2] 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]. 应用声学学报, 2005, **24**(6): 351-358.
SHENG Xueli, HUI Junying, LIANG Guolong. Study on passive detecting technology based on an acoustic time-reversal mirror[J]. Journal of Applied Acoustics, 2005, **24**(6): 351-358.

[3] Dowling D R. Acoustic pulse compression using passive phase-conjugate processing[J]. J. Acoustic. Soc. Am, 1994, **95**(3): 1450-1458.

[4] Kuperman W A, Hodgkiss W S. J. Acoust. Soc. Am, 1998, **103**(1):25-40.

[5] 张同伟, 杨坤德, 雷波, 张鹏. 浅海波导中水平时反线阵聚焦研究[J]. 声学技术, 2008, **27**(5): 104-105.
ZHANG Tongwei, YANG Kunde, LEI Bo, ZHANG Peng. Studies on horizon linear time-reversing array retrofocusing in shallow water[J]. Technical Acoustics, 2008, **27**(5): 104-105.

[6] 张歆, 李斌. 基于 Kraken 简正波模型的浅海声场分析[J]. 西北工业大学学报, 2000, **18**(3): 405-408.
ZHANG Xin, LI Bin. The analysis of the sound field in shallow water based on kraken normal mode[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2000, **18**(3): 405-408.

(上接第 26 页)

[27] Fay B. Numerische berechnung der beugungsverluste im schallfeld von ultraschallwandlern[J]. Acustica, 1976, **36**(3): 209.

[28] YY/T 0163-1994. 医用超声水听器特性和校准[S].

[29] W Shou, J Yan, H Wang, D Qian, Free field reciprocity calibration in a convergent spherical acoustic wave of a focusing transducer[J]. Chinese Physics Letters, 2002, **19**(8): 1131-1134.

[30] 李丽平, 寿文德, 谢志行, 夏荣民. 聚焦换能器的自由场会聚波互易校准的衍射系数计算[J]. 应用声学, 2003, **22**(1): 15-20.
LI Liping, SHOU Wende, XIE Zhixing, XIA Rongmin. Computation of diffraction loss coefficient of free field reciprocity calibration for focusing transducers by use of impulse response integral method[J]. Applied Acoustics, 2003, **22**(1): 15-20.

[31] W Shou, S Duan, P He, R Xia,and D Qian. Calibration of a focusing transducer and miniature hydrophone as well as acoustic power measurement based on free-field reciprocity in a spherically focused field[J]. IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., 2006, **53**(3): 564-570.

[32] M Duan, W Shou, P He, et al. Calibration in a convergent cylindrical acoustic wave of a cylindrical focusing transducer based on free field reciprocity theorem[C]. Proc. World Congress on Ultrasonics-Ultrasonics International, 2005, 164.

[33] 寿文德, 周刚, 夏荣民, 等. SJTU-1 型医用超声设备声输出测量系统的研制[J]. 应用声学, 2004, **23**(2): 1-6.
SHOU Wende, ZHOU Gang, XIA Rongmin, et al. Development of SJTU-1 acoustic output measurement system for the ultrasonic medical diagnostic equipment[J]. Applied Acoustics, 2004, **23**(2): 1-6.

[34] SHOU W, HUANG X, DUAN S, Acoustic power measurement of High intensity focused ultrasound in medicine based on radiation force balance, Ultrasonics[J]. 2006, 44(Supplement 1), e17-e20.