

基于三子阵的组合水平时反阵被动定位性能研究

陈 羽, 倪 明, 张振慧

(国防科学技术大学光电工程学院, 长沙 410073)

摘要: 在海洋波导中, 单个水平阵的被动时反定位性能随声源方位的改变而迅速下降。对于一个 298 基元、基元间隔为 1m 的单个水平阵而言, 当声源入射方向偏离水平阵端射方向超过 70° 时, 被动时反定位失效。针对单水平阵的这一不足, 提出了一种由三个子阵组成的组合式水平阵, 三个子阵之间夹角为 60° , 基元数分别为 100、99、99, 基元间隔为 1m。不论声源方位如何, 组合阵的有效孔径都不小于 150m, 在整个空间区域都能对目标实现有效的被动时反定位。

关键词: 水平时反阵; 被动定位; 有效孔径

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-05-0391-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.05.003

Research on the performance of passive location with a combined horizontal time-reversal array made up of three sub-arrays

CHEN Yu, NI Ming, ZHANG Zhen-hui

(Institute of Photoelectricity Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In the ocean wave-guide, the performance of the passive time-reversal location with a single horizontal array descends rapidly if the direction of the wave source changes. For a horizontal array of 298 hydrophones with 1 meter separation between two hydrophones, when the angle between the direction of the incident signal and the horizontal array line is more than 70 degree, the passive location will fail. In order to solve the problem, a combined horizontal array made up of three sub-arrays is put forward in this paper, the angle between the three arrays is 60 degree, the numbers of hydrophones of the three sub-arrays are 100, 99, 99, and the distance between every two hydrophones is 1 meter. No matter what the direction of the wave source is, the effective aperture of the combined array is more than 150 meters, which achieves effective passive location to the targets in all areas.

Key words: horizontal array; passive location; effective aperture

0 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(TR)。

1991 年, Dowling 对 TRM 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, 大孔径的水平时反阵能对目标实现有效的被动定位^[5]。本文采用计算机仿真分析

法, 采用 KRAKEN 模型^[6]计算时反前后声信号经过的声压信道, 进行时反运算并分析单个水平时反阵以及组合式水平时反阵的被动定位性能。经过分析可知, 单水平阵的有效孔径随着入射声信号偏离水平阵端射方向的角度增加而迅速下降, 直至被动时反定位失效。改进后的组合式水平阵能保证对各个方向的声源都有较大有效孔径, 本文中为不小于 150 m, 从而对各个方向的声源都有较好的被动时反定位性能。

1 时反技术的基本原理

时间反转技术是指阵列接收声源发射的信号, 将其在时间上取反(频域里取复共轭), 并向外发射出去, 声源处时反声场能量明显大于其它区域, 即声能量在声源位置出现聚焦, 它是声互易性原理的应用之一。

收稿日期: 2010-11-22; 修回日期: 2011-02-21

作者简介: 陈羽(1985-), 男, 江苏人, 硕士, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 陈羽, E-mail: chenylm@163.com

1.1 水平时反阵工作原理

如图 1 所示, 不考虑噪声影响, PS 为一探针声源, HTRA 为 N 基元收发合置水平时反阵, 基元等间隔分布, 基元间隔为 d , 铺设在海底, 接收声源发射的信号, 并对其做时反处理后重新发射。VRA 是垂直接收阵, 与声源处于同一水平距离处, 用来接收 HTRA 产生的时反声场, 以观测探针声源所在水平距离处声能量垂直分布的情况。

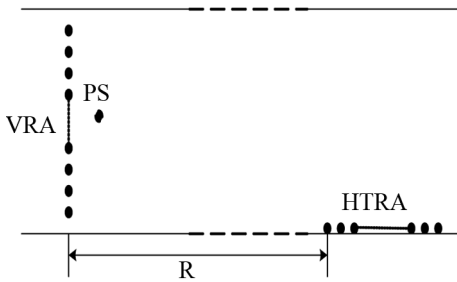


图 1 水平时反阵示意图

Fig.1 Sketch map of horizontal line time-reversal array

水平阵被动时反定位工作过程可分为接收、取反、发射三个阶段。

首先假设声源位于水平阵端射方向, 声源发射信号, 水平阵各个基元接收信号。若探针声源 $(0, z_s)$ 发射信号的频谱为 $S(\omega)$, HTRA 第 j 个基元 (r_j, z_0) 的接收信号为

$$P_j(\omega) = S(\omega)G(r_j, z_0; 0, z_s) \quad (1)$$

在水平分层的海洋环境中, 当满足远场条件时, 由 $(0, z_s)$ 点到 (r, z) 点的声场系统函数(或称格林函数)为

$$G(r, z; 0, z_s) = \frac{ie^{-i\pi/4}}{\rho(z_0)\sqrt{8\pi r}} \sum_{m=1}^{\infty} \phi_m(z_s)\phi_m(z) \times \frac{e^{ik_{r,m}r}}{\sqrt{k_{r,m}}} \quad (2)$$

式(2)中, ϕ_m 和 $k_{r,m}$ 分别表示各号简正波模函数和水平波数。

时域信号取反相当于在频域上取复共轭, 将式(1)取复共轭, 向外发射, 在空间某点 (r, z) 的时反声场为

$$P_{-TR_j}(\omega) = S^*(\omega)G^*(r_j, z_0; 0, z_s)G(r, z; r_j, z_0) \quad (3)$$

N 基元的时反阵在 (r, z) 点产生的时反声场为各基元产生时反声场的叠加:

$$P_{-TR}(\omega) = S^*(\omega) \sum_{j=1}^N G^*(r_j, z_0; 0, z_s)G(r, z; r_j, z_0) \quad (4)$$

式(4)中, $r_{j+1} = r_j + d$, 整个水平阵孔径为 $(N-1) \cdot d$, 只有当孔径足够大时水平阵才能对简正波模态进行充分的空间采样。

当时反前后经过的信道匹配时, 由声场互易性可知, $G(r_j, z_0; 0, z_s) = G(0, z_s; r_j, z_0)$, 所以当点 (r, z)

为声源位置时, 时反输出为时域自相关的峰值, 此时 P_{-TR} 最大, 反映在时反声场能量分布图上, 声源位置出现最大值, 由此实现了对声源目标的被动定位。

1.2 水平阵有效孔径与声源方位的关系

在通常情况下, 声源不会理想地出现在水平阵端射方向, 以上理论推导也适用于声源不在水平阵端射方向的情况, 若声源偏离端射方向, 则水平阵的有效孔径和阵元间距都将相应变小。真实水平阵的长度和阵元位置与有效水平阵的长度和阵元位置之间的关系可通过三角关系确定, 如图 2 所示。

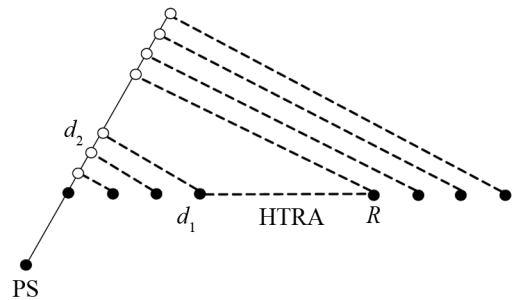


图 2 有效阵孔径与有效阵元间距示意图

Fig.2 Sketch map of effective array aperture and distance between sensors

设声源与参考基元的连线与水平阵所在直线夹角为 θ , 则式(4)中 $r_{j+1} = r_j + d \cdot \cos \theta$, 整个水平阵孔径为 $(N-1)d \cos \theta$ 。随着夹角 θ 的增大, 水平阵阵元间距与有效孔径都将减小, 导致水平阵各基元对简正波模态空间采样不充分, 影响被动时反定位性能。

2 仿真实验及分析

2.1 仿真条件

假设海洋环境不随时间变化, 不考虑噪声影响。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 3(a)及图 3(b)所示。其中沉积层与基底密度为 $\rho = 1.75 \text{ g/cm}^3$, 衰减系数 $\alpha = 0.35 \text{ dB}/\lambda$ 。

2.2 单个水平阵被动时反定位性能与声源方位关系仿真

首先讨论声源入射方向改变单个水平阵的被动时反定位性能。

设水平阵铺设在海底, 基元数为 298, 基元间隔为 1 m, 水平阵呈直线状。声源为一高斯脉冲信号, 脉宽为 20 ms, 中心频率为 500 Hz, 带宽为 100 Hz。声源深度为 30 m, 与水平阵参考基元水平距离

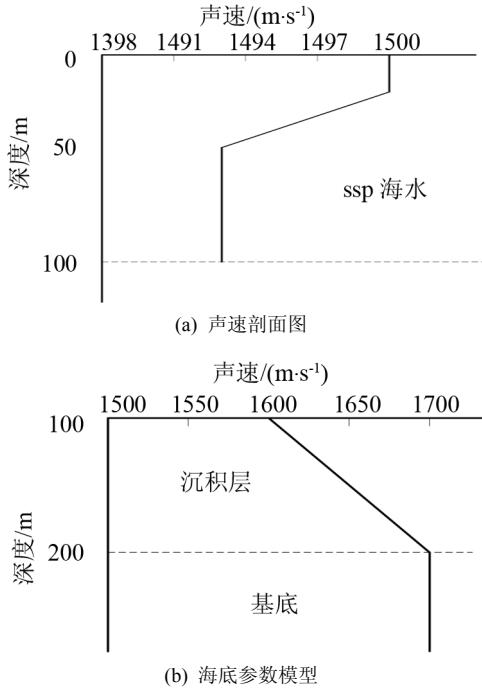


图 3 浅海典型声速剖面 and 海底参数
Fig.3 Typical SSP and sea-bottom parameters of shallow water

为 10km。

利用 KRAKEN 简正波模型分别计算信号来回经过的信道，两者完全匹配。当声源入射方向在水平阵所在直线方向单边(0, 90°)范围内变化时，图 4 给出了声能量在声源所在位置垂直方向上的分布随声信号入射角度变化的规律。

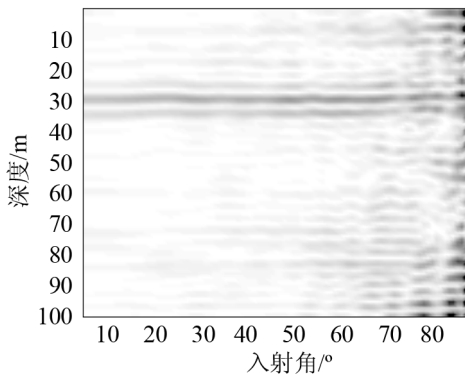


图 4 单个水平阵被动时反定位性能图
Fig.4 The map of the performance of the passive time-reversal location with a single horizontal array

由图 4 可知，对于一条 298 基元、间隔为 1 m 的水平阵，其可视范围为以端射方向为轴线，左右张角各为 70° 的区域内，如图 5 所示。在此区域之外，由于入射角度与水平阵夹角较大，使得水平阵的有效孔径变小，从而使得时反聚焦性能变差。

2.3 组合式水平阵被动时反定位性能与声源方位关系仿真

因为单个水平时反阵的有效孔径会随着入射声

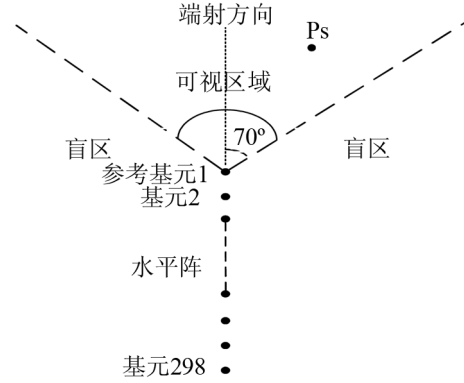


图 5 水平阵被动时反定位可视范围示意图
Fig.5 The visible area of the passive time-reversal location with a horizontal array

信号的变化而变小，从而影响其被动定位效果。为尽量缩小被动时反定位探测盲区，增大可探测区域，提出了一种组合式的水平阵作为时反阵，可有效改善时反阵对于各个方向入射声信号的被动时反定位性能。该阵列由三条水平阵 L_1 、 L_2 、 L_3 组成，铺设在海底，基元数分别为 100、99、99。基元间隔为 1 m。 L_1 、 L_2 、 L_3 之间夹角是 $2\pi/3$ ，由 O 点连接在一起，见图 6。

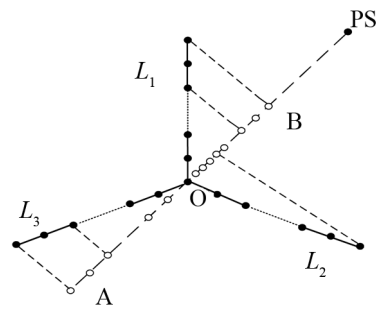


图 6 组合式水平时反阵示意图
Fig.6 Sketch map of a combined horizontal time-reversal array

组合水平阵中选取 L_1 子线列阵的第一个基元为参考基元，则在 $y > 0$ 区域，以 L_1 子线列阵的端射方向为参考方向，设上述单水平阵与 L_1 所在直线方向共线，依照简单的几何计算可以得出声信号入射方向。在 $(-90^\circ, 90^\circ)$ 范围内，两者的有效孔径数值如图 7 所示。

由图 7 可知，若单个水平阵与组合式水平阵总基元数相等，当入射方向偏离水平阵端射方向较小时，单个水平阵能保持较大的有效孔径，在 $(-60^\circ, 60^\circ)$ 范围内有效孔径值大于 150m，最大值出现在入射方向与端射方向所在直线重合时，此时有效孔径大小为水平阵自身孔径，即 297 m。然而，当入射方向与端射方向的夹角大于 60° 时，有效孔径迅速减小，当夹角接近垂直时，有效孔径值接近于 0m。

对于组合式水平阵而言，不论声源入射方向如何，其有效孔径不小于 150m。这是由于组合式水

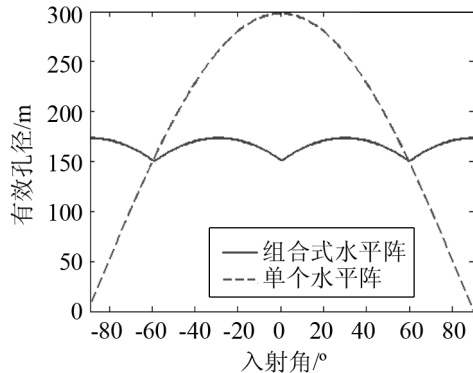


图7 组合式水反阵与单个水平阵有效孔径比较图

Fig.7 Comparison of the effective aperture between the combined horizontal array and the single array

平时反阵的有效孔径是由 L_1 、 L_2 、 L_3 按照三角关系等效而共同组成的总有效孔径，当 L_1 子阵有效孔径较小时， L_2 、 L_3 子阵必有较大的有效孔径，因而总能保证对各个方向入射的信号有较大的有效孔径，因此对各个方向入射的声信号都能有较好的被动时反定位效果。

需要注意的是，由于组合式水平时反阵将基元均匀分布在 L_1 、 L_2 、 L_3 三个方向上，虽然对任意方向的声源都能保证较大的有效孔径，但是其最大有效孔径会显著小于相同基元数的单水平阵的孔径。

下面给出组合式水平时反阵声源处能量聚焦性能随声信号入射方向的变化图。声场环境不变，采用图5所示的组合式水平时反阵铺设在海底。选取O点基元为参考基元，以 L_1 子阵列阵的端射方向为参考方向。因为 L_1 、 L_2 、 L_3 彼此之间夹角为 $2\pi/3$ ，由对称性可知，只需讨论以 L_1 所在直线为轴线，轴线左侧或右侧张角为 $(0^\circ, 60^\circ)$ 范围内声源处能量聚焦变化情即可。

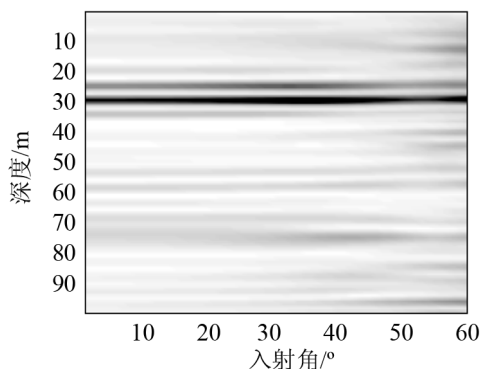


图8 组合式水平阵被动时反定位性能图

Fig.8 The map of the performance of the passive time-reversal location with the combined horizontal array

显然，在 L_1 所在直线方向单边 $(0^\circ, 60^\circ)$ 范围内，组合阵都有很好的时反聚焦性能，由对称性可知在整个空间范围内，组合阵都有较好的时反聚焦性能，对于被动探测而言可视范围是整个空间，不存在理论盲区。所以组合式水平时反阵很好地弥补了单个水平时反阵探测性能随入射声信号变化而下降的不足。但是在实际应用中，其复杂的结构将给海上施工带来增加难度。

3 结论

本文采用 KRAKEN 简正波声场计算模型仿真计算了单个水平阵对非端射方向的声源被动定位性能，得出随着声信号入射方向偏离端射方向角度的增大，单水平阵被动时反定位性能下降，直至被动定位失效的结论。为克服单个水平阵这一不足，提出了一种组合式的水平阵，对任何方位的声源都能保持较大的有效孔径，在整个空间范围内，都能对声源保持较好的被动定位效果。

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, 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.
- [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. Phase conjugation in the ocean: Experimental demonstration of a time reversal mirror[J]. 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.