

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.05.001

时间反转镜被动定位技术对环境宽容性研究

刘磊, 魏玉华

(海军驻北京地区武备配套军事代表室, 北京 100082)

摘要: 以时间反转镜的特性为基础, 介绍声压反转镜和矢量反转镜技术, 对单传感器 TRM 被动定位技术的环境宽容性进行仿真分析。结果表明, 海面声速分布差异会对时间反转镜的聚焦效果产生影响, 对声压反转镜和矢量反转镜的影响不大, 对水平方向和深度方向的影响亦不大。处理频带对该种失配条件下的 TRM 聚焦效果影响显著, 高频段时对海面声速失配的稳健性低, 低频段时, 稳健性强。

关键词: 时间反转镜; 被动定位技术; 环境宽容性

中图分类号: TN914.31; TP391.9 **文献标识码:** A

Research on Environmental Tolerance Based on TRM Passive Orientation Technology

LIU Lei, WEI Yu-hua

(Military Representatives Office of Navy in Beijing Supplying Appendix for Weapon Equipment, Beijing 100082, China)

Abstract: Sound pressure reversal mirror and vector reversal mirror are introduced, used time-reversal mirror (TRM) characteristic as basic, analyzed of its environmental tolerance for single sensor TRM passive positioning technology. The results show that variance of surface sound speeds can affect the focusing effect of TRM, but it affects the effect of sound pressure reversal mirror and vector reversal mirror less as the same as the effect in the horizontal direction and depth direction. Processing bands affect the focusing effect of TRM under the mismatching circumstance, and robustness for surface sound speed is lower at high frequency bands, while it is strong at low frequency bands.

Keywords: TRM; Passive orientation technology; Environmental tolerance

0 引言

近年来, 声压及矢量时间反转镜技术成为新的研究热点。通常用水听器输出声压, 用矢量传感器同点同时输出声压和振速。基于矢量传感器时间反转镜技术被称为“矢量反转镜”技术^[1]。矢量反转镜比声压的性能更好, 可提高被动声纳的探测能力。时间反转镜可用来消除介质不均匀和边界对探测和成像的影响, 不需要知道详细的先验知识, 只要求在一段时间内边界和介质是稳定的(即要求是慢变化的)^[2]。这一特性可用于克服信道多途对声纳探测带来的影响, 提高被动探测的性能。故主要对单传感器 TRM 被动定位技术的环境宽容性进行仿真分析, 给出 TRM 被动定位环境宽容性的相关结论。

1 基本原理

1.1 TRM 原理

水下声信道是相干多途信道。当不考虑空间不均匀和界面不均匀性的随机性时, 水声信道的空变特性可以用相干多途信道的系统函数表示。

由于水下声信道的多途效应及所含信息, 可综合利用各途径到达的信号分量。借鉴匹配滤波器空

间匹配滤波的思想, 如果用 $S(\omega)$ 表示信号的频谱, $H(\omega)$ 表示信道的传输函数, 则信号经过信道输出的频谱为:

$$R(\omega) = H(\omega) \cdot S(\omega) \quad (1)$$

令 $X(\omega)$ 是 $R(\omega)$ 的复共轭, 即:

$$X(\omega) = R^*(\omega) = H^*(\omega) \cdot S^*(\omega) \quad (2)$$

将式 (2) 两边同乘 $H(\omega)$, 可得到:

$$Z(\omega) = H(\omega) \cdot H^*(\omega) \cdot S^*(\omega) \quad (3)$$

式中: $H(\omega) \cdot H^*(\omega)$ 一项是实、偶、正函数, 它在时间零点的傅里叶反变换是同相叠加的, 会得到主相关峰值, 这使得信号与其乘积的结果 $Z(\omega)$ 比 $R(\omega)$ 要大得多。这就是水声信道中时间反转镜聚焦的根本原理。

在式 (1)、式 (2) 中, $X(\omega)$ 是接收信号频谱 $R(\omega)$ 的复共轭, 对应时域上的即为接收信号的时间反转, $Z(\omega)$ 是时间反转镜输出的频谱。

1.2 声压反转镜原理

声压反转镜是空间匹配滤波器, 如图 1, 信号 $s(t)$ 从声源 $a_0(r_0, h_0)$ 传播到接收点 R 处所经过的

收稿日期: 2009-12-15; 修回日期: 2010-01-16

基金项目: 国家部委基金资助项目(4010501010102)

作者简介: 刘磊 (1979-), 男, 河北人, 硕士, 工程师, 从事水声通信科研与产品质量管控研究。

海洋信道用冲激响应函数 $h_p(\tau, r_0, h_0)$ 表示，其中 r_0 、 h_0 表示声源的水平及垂直坐标，水平方向以接收机所在位置为距离零点。接收到的信号和本地环境干扰叠加成为水听器的输出 $y_p(t)$ 。依据实测得到的海洋声速分布、海区深度及海底声学特性，可以对信道建模，得到 R 点到海洋中各点 $a_i(r_i, h_i)$ (其

中包含 a_0 点) 间的信道 $h_p(\tau, r_i, h_i)$ ，将 $y_p(t)$ 时反后再次通过信道 $h_p(\tau, r_i, h_i)$ (这一过程在信道模型中进行)，得到一个输出信号 $z_p(t, r_i, h_i)$ 。这相当于虚拟地将信号与本地噪声在时间上反转后再发送到海洋中，在不同点接收。这就是虚拟反转镜技术的简要描述。

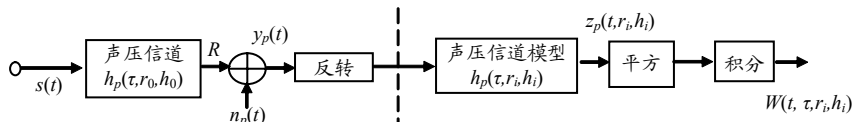


图 1 声压反转镜框图

若无建模误差，则当 $r_i = r_0$ ， $h_i = h_0$ ，即虚拟接收点 a_i 和信号源点 a_0 匹配，信道 $h_p(\tau, r_i, h_i)$ 与 $h_p(\tau, r_0, h_0)$ 完全匹配，则反转镜实现信道的空间匹配，空间增益达到最大值；而当 $r_i \neq r_0$ ， $h_i \neq h_0$ 时，信道 $h_p(\tau, r_0, h_0)$ 与 $h_p(\tau, r_i, h_i)$ 失配，空间增益就减

小。

综上所述，声压反转镜技术实现了对相干目标的空间匹配滤波。

1.3 矢量反转镜原理

矢量反转镜是由声压反转镜发展而来的，其框图如图 2。

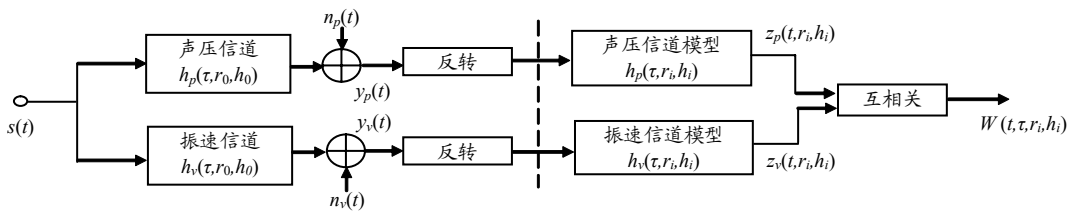


图 2 矢量反转镜框图

矢量反转镜也能在 $r_i = r_0$ ， $h_i = h_0$ 时有最大的空间增益。但是它除了声压信道外还增加了一个振速信道，这样在接收点 R 处就可以获得目标声压和目标振速这对相关的信号；而本地干扰声压 $n_p(t)$ 和干扰振速 $n_v(t)$ 均为各向同性的，即二者是不相关的。将 $y_p(t)$ 和 $y_v(t)$ 时反后与虚拟信道作卷积，得到的 $z_p(t)$ 和 $z_v(t)$ 除了各自有空间增益外，相互之间还有一定的关系，即 $z_p(t)$ 和 $z_v(t)$ 中的信号分量是相关的，而干扰分量是不相关的。故可以用互相关器来抑制各向同性干扰，提高输出信噪比。

2 TRM 被动定位技术对环境的宽容性仿真

TRM 处理需要在某些已知参数有足够精度的假定下建立信道模型，这些已知参数如声速分布或接收水听器的位置是无需改变的。但是任何已知参数的精度都不会是理想的，即使是不变的参数也会有一定的误差。关于声速分布，实际测量通常是先

探测温度和盐度随深度的变化，然后再通过经验公式转化为声速。这些经验公式及其输入的数据相对真值都有误差。此外，海洋小尺度不均匀特性的影响、海面运动（海浪影响）、散射、内波和潮汐以及洋流的影响，使得声速环境随时间发生变化。因此，建模用的声速和信号实际传播时的声速不会是精确一致的。这直接导致建模的信道 $h_p(\tau, r_i, h_i)$ 、 $h_v(\tau, r_i, h_i)$ 和信号实际通过的信道 $h_p(\tau, r_0, h_0)$ 、 $h_v(\tau, r_0, h_0)$ 有差异。下以海面声速分布失配来说明 TRM 被动定位技术对环境宽容性。

建模时所用的海面声速度若与海洋中实际的海面声速度存在差异，会对反转镜的聚焦效果产生影响。给出 3 种声速分布如图 3，假设 sd0 为信号到达接收机所经过的真实信道，其海面处的声速度为 $c_0(0) = 1535 \text{ m/s}$ ；sd1 和 sd2 均为信道建模时所用的信道，其中 sd1 海面的声速度 $c_1(0) = 1533 \text{ m/s}$ ，与 $c_0(0)$ 相差 2 m/s；sd2 海面的声速度 $c_2(0) = 1530 \text{ m/s}$ ，与 $c_0(0)$ 相差 5 m/s。下面给出用 sd1、sd2 建模时时间反转

镜的检测与定位结果。

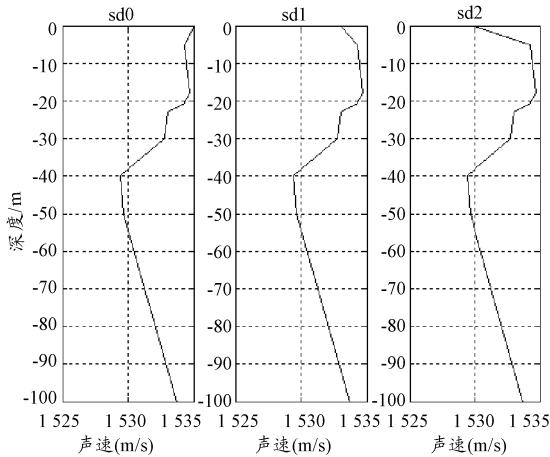
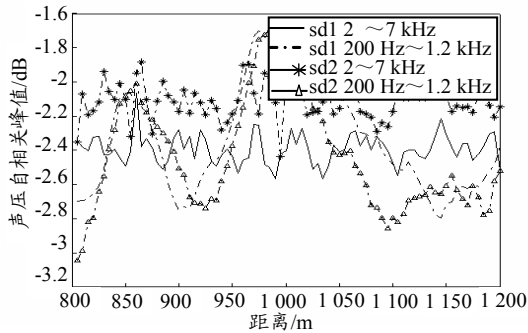
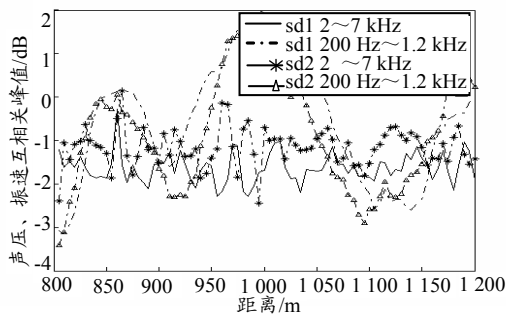


图 3 海面声速分布差异示意图

仿真条件: 接收机位置 (0, -20 m), 声源位置 $a_0(r_0, h_0) = a_0(-1000, -30)$; 接收机带宽为 2~7 kHz 时, 信噪比 $SNR = 0.72$ dB; 接收机带宽为 200 Hz~1.2 kHz 时, 信噪比 $SNR = 1.2$ dB; 信号样本长度 0.5 s。



(a) 声压自相关峰值

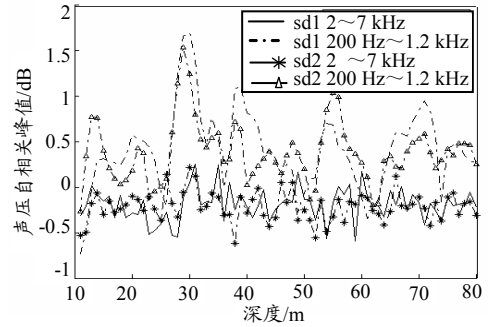


(b) 声压、振速互相关峰值

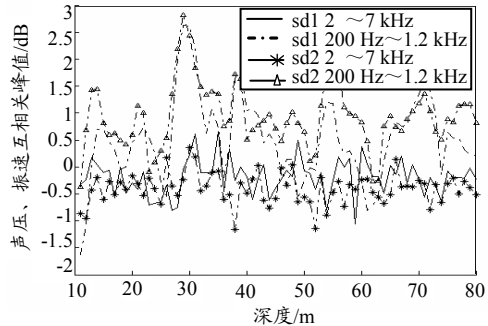
图 4 在距离方向上海面声速分布差异对 TRM 影响

图 4(a) 表明在距离方向上 1 000 m 时实现了聚焦, 说明海面声速分布差异会对声压反转镜聚焦效果产生影响, 但在水平方向影响不大; 在接收机带宽为 2~7 kHz 时, 海面声速失配对声压自相关峰值 (即声压反转镜处理) 影响明显, 稳健性差; 接收机带宽为 200 Hz~1.2 kHz 时, 海面声速失配对声压自相关峰值 (即声压反转镜处理) 稳健性有所增

强。图 4(b) (即矢量反转镜处理) 表明, 在距离方向上即 1 000 m 时, 聚焦效果明显, 也说明海面声速分布差异会对矢量反转镜聚焦效果产生影响, 但在水平方向影响不大; 高频段仍然对处理效果影响明显, 但是低频段时处理效果明显增强, 稳健性高。在深度方向上, 图 5 中的结果基本与图 4 结果类似。



(a) 声压自相关峰值



(b) 声压、振速互相关峰值

图 5 在深度方向上海面声速分布差异对 TRM 影响

3 结论

从图 4 和图 5 中关于不同海面声速分布差异、不同处理带宽下 TRM 的仿真结果可以得出结论: 1) 海面声速分布差异会对时间反转镜的聚焦效果产生影响, 这种影响对声压反转镜和矢量反转镜的差异不大, 对水平方向和深度方向的差异亦不大。2) 处理频带对该种失配条件下的 TRM 聚焦效果影响显著。处理高频段时, 对海面声速失配的稳健性低; 相反, 处理低频段时, 稳健性高, 可在海面声速失配 5 m/s 的条件下实现 TRM 聚焦。

参考文献:

[1] Hee Chun Song, Kuperman W A. A time-reversal mirror with variable range focusing[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1998, 103(6): 3234-3240.
 [2] Khosia S R, Dowling D R. Time-reversing array retrofocusing in simple dynamic underwater environments[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1998, 104(6): 3339-3350.
 [3] 李黎, 苏强, 叶和军. 基于无电离层模型的动态精密单点定位[J]. 四川兵工学报, 2009(1): 47-50.