

堤坝检测水下机器人水声定位抗多途干扰方案研究^①

乔 钢^② 李 壮 孙宗鑫

(哈尔滨工程大学水声技术国防重点实验室 哈尔滨 150001)

摘 要 针对堤坝检测水下机器人在水下定位过程中极易受到由水面、坝体等引起的多途干扰的问题,提出了一种结合时间反转镜(TRM)技术抗多途干扰的水下定位方案。该方案利用时间反转在自由场可以聚焦的特点,在信标模式下通过对定位阵元接收到的信标信号信道估计,虚拟地实现时间反转聚焦抗多途干扰;在应答模式下通过时间反转应答器中接收到的信号,再返回给定位阵元接收,主动地实现时间反转聚焦抗多途干扰。仿真和实验数据表明,采用时间反转聚焦信道多途的作用,改善了信道多途对定位阵元信号检测精度的影响,解决了由多途引起的解算轨迹产生的野点及间断点等问题。

关键词 堤坝检测,水下机器人(ROV),时间反转,水声定位,应答器,多途干扰

0 引 言

水声定位系统是堤坝检测水下机器人(remote-operated vehicle, ROV)工作时必不可少的设备,定位系统要对机器人进行实时定位,辅助机器人导航,并在机器人检测出问题时确定目标位置。堤坝检测水下机器人主要工作在坝体旁边^[1,2],水声定位系统布置在坝上。由于坝体两侧水域有截断水面,此时的定位有别于在广阔水域中的物体定位,当对在该处物体定位时,由于坝体、水面、水底等反射系数较强的介质会产生较强的多途回波,多途回波在接收处掺杂在目标信号中,严重影响了信号直达声的检测,因此多途效应是影响探坝机器人定位精度的主要因素,如何减少多途干扰是水声定位系统的难点。文献[3,4]通过改造声源发射信号形式,使之发射带有某种“标志”的脉冲,减少距离模糊,从而达到抗多途干扰的作用。文献[5,6]分别采用信号的相消干涉特性及从模型软件上出发减小多途干扰的影响,以改善水声定位系统性能。

本文从多途信道本身入手,提出了利用时间反转聚焦信道多途的特性对堤坝检测水下机器人进行水声定位的方法,国外学者在时间反转镜(time-reversal mirror, TRM)方面进行了大量的研究,文献[7,8]

从理论上对时间反转法聚焦原理进行了详细的说明和论证。文献[9-11]从实验上深入研究了时间反转技术的物理过程和基本原理,并且应用于水声通信、水声探测领域,给出了很多试验结果。本文根据堤坝检测机器人水下定位原理,采用一种基于单阵元时间反转技术抗信道多途的方案^[12-14]。该方案采用两种工作模式。在信标模式下采用单阵元虚拟时间反转技术,可在定位阵元中通过信道估计虚拟地实现时间反转过程,在应答模式下采用单阵元主动时间反转技术,利用应答器中接收到的询问信号为载体,时间反转该询问信号再返回给定位阵元接收,主动地完成时间反转过程。该方案无需任何先验信息和冗余阵元,达到聚焦信道多途的作用,改善了信道多途对定位阵元的影响,提高了水声定位的精度。

1 单阵元时间反转算法原理

1.1 单阵元虚拟时间反转原理

对于单阵元虚拟时间反转,阵元只需要具有接收功能,且不需要两次发送信号,去除了单阵元主动时间反转在反向传输时发射的噪声干扰影响。将接收到的信号与估计信道系统函数的时间反转作卷积,虚拟地实现时间反转过程。虚拟时间反转算法的前提是估计出信道的系统函数,当采用拷贝相关

① 863 计划(2009AA093601-2)和国防基础科研(B2420710007)资助项目。

② 男,1974 年生,博士,教授;研究方向:水声通信,水下目标探测;联系人,E-mail: qiaogang@hrbeu.edu.cn
(收稿日期:2012-03-26)

法估计时收发阵元之间的信道冲击响应函数可以表示为 $h_r'(-t; z_1, z_2)$, 其中 z_1, z_2 分别表示阵元深度, 对接收信号进行时间反转处理后可以表示为

$$r(-t) = h_r(t; z_1, z_2) * s(-t) \quad (1)$$

其中 $*$ 为卷积符号, 下同。令信号与估计的时间反转信道系统函数卷积, 则接收端的信号可以表示为

$$R(t) = h_r(t; z_1, z_2) * s(-t) * h_r'(-t; z_1, z_2) \quad (2)$$

利用信号拷贝相关技术可以精确地分辨不同途径的时延差, 进而完成虚拟时间反转的信道估计, 则 $h_r(t; z_1, z_2) * h_r'(-t; z_1, z_2) = h_{\text{VTRM}}(t, r)$, 其可视为是声源信号最终经过的信道, 并且也是水声信道冲激响应 $h_r(t; z_1, z_2)$ 与其估计 $h_r'(-t; z_1, z_2)$ 的互相关函数, 可以称为虚拟时间反转信道。当 $h_r'(-t; z_1, z_2)$ 近似等于 $h_r(t; z_1, z_2)$ 时, 即真实信道与估计的信道相匹配时, 此时的虚拟时间反转信道的多径信号能量叠加, 产生聚焦效应, 可以抑制水声信道多径信号的干扰影响并获得了聚焦增益, 这也是单阵元虚拟时间反转聚焦的根本原理。

1.2 单阵元主动时间反转原理

单阵元主动时间反转算法, 是指把接收到的信号时反后再次发射回去, 即声信号两次经过海洋信道后再在原声源处被接收, 能自动地在原发射位置处形成聚焦的技术。在多途水声信道环境中, 单阵元换能器发射信号 $s(t)$ 等同于一维虚拟垂直线阵发射信号, 设发射换能器与接收换能器间的声场用信道冲激响应函数表示为 $h_r(t; z_1, z_2)$, 其中 t 表示两者之间的传播时间; z_1, z_2 分别表示它们所处的深度。将接收到信号在接受位置处时反处理后重新发射给原声源位置, 其反转后的声场的时域表示为 $h_r(-t; z_2, z_1)$ 。因而, 最终在原声源处的信号可以表示为

$$R(t) = h_r(t; z_1, z_2) * h_r(-t; z_2, z_1) * s(-t) \quad (3)$$

根据声场互易性原理, 从发射端到接收端的信道冲击响应 $h_r(t; z_1, z_2)$ 近似等于从接收端到发射端的信道冲击响应 $h_r(-t; z_2, z_1)$ 。在理想状态下 $h_r(t; z_1, z_2) * h_r(-t; z_2, z_1) \approx \delta(t)$, 即接收信号将在原声源处自适应地产生聚焦, 聚焦的效果是降低了信道多途对声源信号 $s(t)$ 的影响。单阵元主动时间反转克服了信道多途效应影响, 并能利用信道的多途实现单阵元的自动聚焦, 这就是单阵元主动时间反转聚焦的根本原理。

2 水声定位方案分析

2.1 水声定位原理

堤坝检测水下机器人水声定位原理如图 1 所示, 采用二元阵球面定位模型, 为了简化定位模型, 只考虑声线直线传播形式, 则其定位模型为

$$R_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2, \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

$$R_i = c(t_1 - t_2 - \Delta t)$$

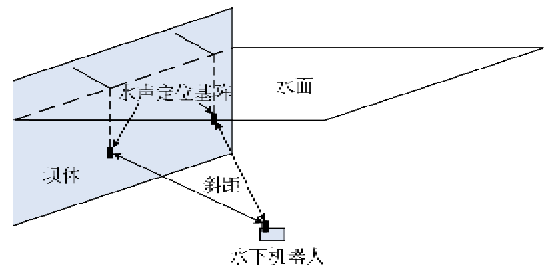


图 1 堤坝检测机器人水声定位原理图

R_i 表示水声定位阵元距离应答器的斜距, 为了适应系统外部环境的需要, 该定位系统采用两种工作模式, 当水下机器人从远端到堤坝移动时, 此时要求水声定位系统要有较高传输帧率, 采用信标工作模式。而当机器人靠近堤坝附近进行堤坝检测时, 需要较高的定位精度, 此时采用应答工作模式。两种工作模式的目的都是为了获得斜距 R_i 的值, 在堤坝检测机器人定位系统中, (x_i, y_i, z_i) 为水声定位阵元第 i 阵元的位置坐标, (x, y, z) 为水下机器人携带应答器的坐标, 利用了机器人上的测深装置可以得到深度信息; 则 z 可以表示为已知量, 式(4)中只有 (x, y) 为未知量, 其余均为已知量。经过方程解算可以获得堤坝检测机器人的定位坐标。

2.2 信标模式抗多途方案分析

对于信标模式定位系统, 水声定位阵元仅具有接收功能, 水下声源信标发射询问信号, 采用单阵元虚拟时间反转算法抗多途。如图 2 所示, 信号只经过

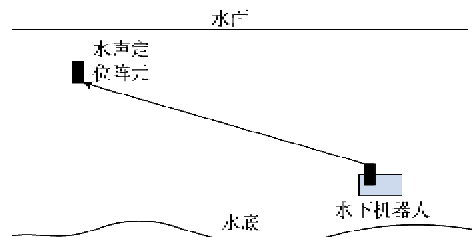


图 2 信标式虚拟时间反转示意图

一次信道,因此采用虚拟时间反转算法,首先采用高精度同步定时设备,在每次测量之前,对被测声源的时钟与接收系统进行同步定时,然后信标按同步时刻定时发射询问信号。询问信号采用线性调频信号,在接收端利用虚拟时间反转聚焦信道多途的特性,对接收信号进行检测处理,其主要流程如图3所示。当接收到的信号拷贝相关处理完毕后,设定初始门限,该门限的作用为判断带有多途信息的询问信号是否到来。当判定为是时,根据接收到的多途回波信号估计信道的系统函数。利用估计的信道系统函数对该接收的询问信号做虚拟时间反转镜(virtual TRM, VTRM)处理。设定二次门限进行检测判定,进而精确确定时延时刻,利用该时延值从而确定信标载体到两个水声定位阵元的距离,然后传给岸上主机,主机结合深度数据就可以确定机器人的平面位置。

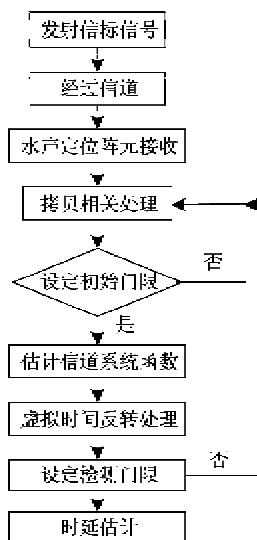


图3 信标式虚拟时间反转流程图

2.3 应答模式抗多途方案分析

对于应答模式的定位系统,水声定位阵元是一个收发合置的换能器,水下应答器既可以接收信号,又可以发射信号,因此采用主动时间反转算法抗多途干扰,如图4所示。采用应答式定位系统时,为了获

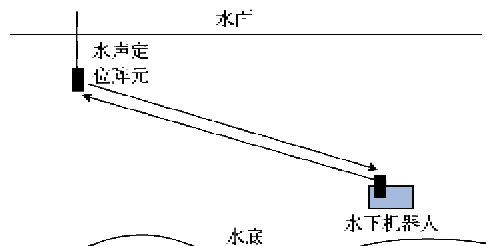


图4 应答式主动时间反转示意图

得应答器位置,选用式(4)所示的水声定位模型,首要任务是确定各个距离 R_i , 设水声定位单元信号询问时刻为 t_1 , 信号经过应答器再返回到水声定位阵元的时刻为 t_2 。应答器内系统延时时间为 Δt , c 表示水中的平均声速,则有

$$R_i = c((t_1 - t_2)/2 - \Delta t) \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)获得定位坐标。此时,因为信号经过两次信道,将主动时间反转算法结合到应答模式定位中,利用主动时间反转自适应聚焦信道多途的效应,其主要流程图如图5所示,水声定位各阵元发射询问信号,询问信号经过一次信道后,水下机器人携带的应答器接收,经过时间反转处理后应答返回,应答信号又一次经过信道。水声定位阵元接收,根据声场互易性原理,水声定位阵元与应答器之间的信道系统函数近似等于应答器与水声定位阵元之间的信道系统函数,即

$$h_{12}(t) \approx h_{21}(t) \quad (6)$$

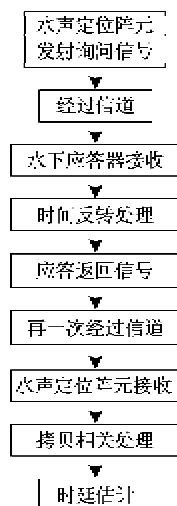


图5 应答式主动时间反转流程图

通过时间反转理论分析,信号由水声定位阵元发出,应答器接收时间反转处理后返回水声定位阵元,可以表示为

$$\begin{aligned} R(t) &= s(-t) * h_{SR}(-t) * h_{Ri}(t) \\ &\approx s(-t) * h_{iR}(-t) * h_{Ri}(t) \\ &\approx s(-t) * \delta(t) \end{aligned} \quad (7)$$

当信道系统函数越复杂,多途效应越严重时, $h_{iR}(-t) * h_{Ri}(t)$ 卷积生成的 $\delta(t)$ 越尖锐,聚焦多途效果越好。

3 水声定位抗多途方案仿真分析

3.1 信标抗多途方案仿真

采用信标定位方式时,由于堤坝水声信道上下

边界及坝体等会引起多途时延扩展,在该信道下时延扩展可达到几百 ms,多途时延扩展不仅会导致前后脉冲间的相互干扰,产生距离模糊,而且产生的多途影响了相关峰阈值的检测,增加了信号检测和估计的难度^[5,15]。增加脉冲间距虽然会减小这种干扰,却会使系统帧率降低。本文提出的应对方法是采用虚拟时间反转算法,利用虚拟时间反转聚焦信道多途的特性,减少信道多途对信标发射信号脉冲间的干扰,如图 6 所示,信标发射信号周期为 100ms,信号形式为 LFM,长度 10ms,信号频率为 35–45kHz。水下阵元位于离水面 10m,信标位于距水面 40m,水深 40m,两者相距 1000m。接收信号都经过拷贝相关处理,从图分析得到没有经过虚拟时间反转处理(NO VTRM)的信标信号,多途干扰严重,不能分辨出真正的相关峰,并且前一个周期的多途信号混杂在下一个周期信标信号中。而经过虚拟时间反转处理(VTRM)的信号,每一个周期的相关峰都比较明显,并且没有多途伪峰的干扰,避免了距离模糊的产生。

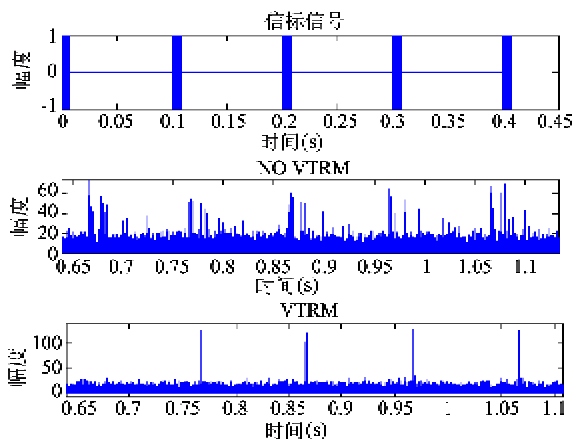


图 6 虚拟时间反转变抗多途干扰仿真图

分析采用信标模式定位方法的误差,图 7 表示水声定位基阵间距 20m 时水平定位误差散点图,在给定的基线位置的条件下,不考虑其他误差,仅考虑时延估计的精度,不同方法的时延估计精度不同。图 7 中的圆形表示置信度为 97.5% 时的定位误差分布界限,从图中分析可知,利用虚拟时间反转(VTRM)算法的定位误差散点分布比较集中,置信度优于没有利用虚拟时间反转算法的散点图。

3.2 应答抗多途方案仿真

采用应答式定位方式时,虽然采用应答信号会避免信标定位中的距离模糊问题,但是由于应答信号两次经过水声信道,而水声信道引起多途时延扩

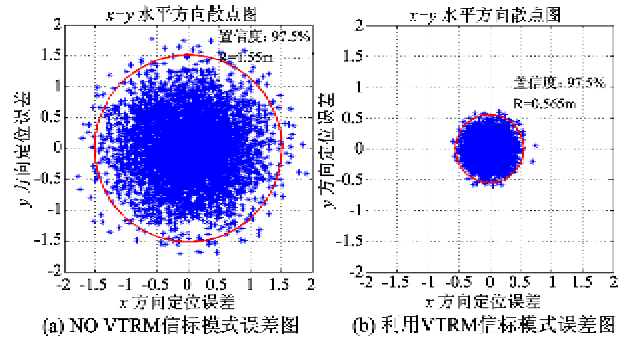


图 7 定位散点图

展也会严重影响时延估计的精度。利用应答信号两次经过信道的特点,将单阵元主动时间反转算法结合到水声定位系统中,利用主动时间反转自适应聚焦信道多途的效应,减少信道多途对时延估计的影响。仿真信号形式为 LFM,长度 10ms,信号频率为 35–45kHz。仿真环境为水下阵元位于离水面 10m,应答器位于距水面 40m,水深 40m,两者相距 1000m。如图 8 所示,此时水声信道比较复杂,多途扩展严重。当未采用主动时间反转(TRM)算法处理的应答信号时,采用拷贝相关处理时不能准确找到相关峰时刻,多途伪峰干扰严重。而采用主动时间反转(TRM)算法时,其拷贝相关输出相关峰比较明显,时延估计优于前者。

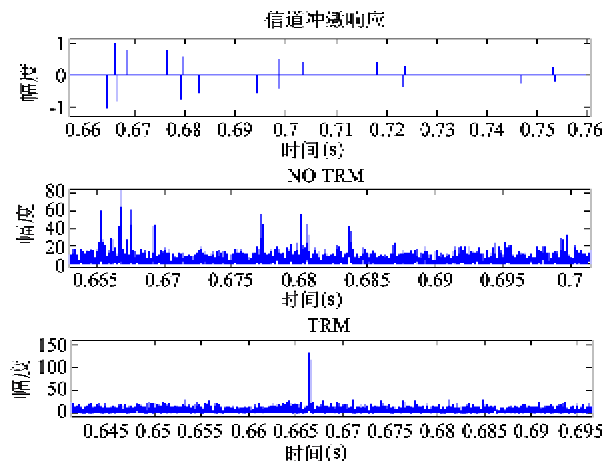


图 8 主动时间反转变抗多途干扰仿真图

分析应答定位方法误差,图 9 表示水声定位基阵间距 20m 时水平定位误差散点图,在给定的基线位置的条件下,仅考虑时延估计的误差,图 9 中的圆形表示置信度为 97.5% 时的定位误差分布界限,从图中分析可知,利用主动时间反转算法的定位误差散点分布比较集中,置信度优于没有利用主动时间反转算法的散点图,与信标散点图比较定位精度优

于信标式定位,原因是采用应答方式定位避免了由于同步不准产生的定时偏差。

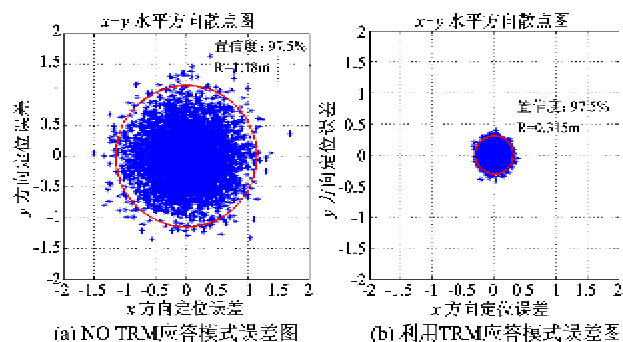


图9 定位散点图

4 湖试实验数据分析

仿真研究验证了一种单阵元时间反转定位系统的可行性,为了进一步验证系统的有效性,于2011年在某湖进行了堤坝机器人定位的湖试实验,湖面相对平坦,湖底不平,湖深度大概50m。声速剖面如图10所示。相对于水面来说,水底介质往往有更大的声吸收,同时机器人靠近水面进行来回运动,水面

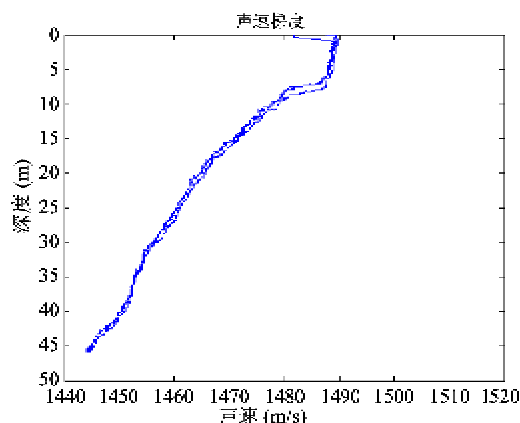


图10 声速剖面图

多途影响非常严重。在实验过程中,堤坝监测机器人分别在信标抗多途模式、应答抗多途模式、普通模式下工作,三种模式都按照固定轨迹来回运动,最后测得三种模式下机器人定位轨迹如图11至图13所示。

从湖试结果看,没有采用任何抗多途算法的运动轨迹受到多途等影响,野点相对比较多,并且轨迹存在间断点。在利用时间反转算法解算时,在信标定位抗多途模式下,信标信号形式为LFM,信号周期为8.192ms,信号频带为35~45kHz。利用定位阵元中通过信道估计可以实现虚拟的时间反转,进而实现聚焦信道多途的作用。

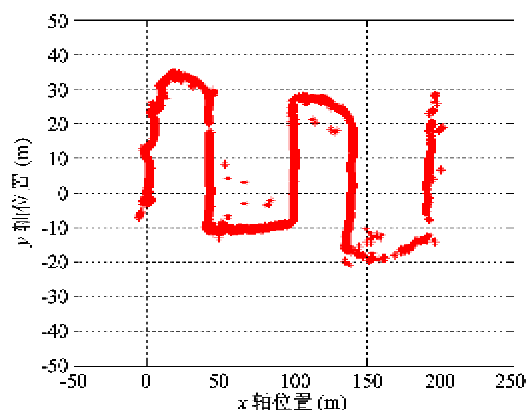


图11 普通方法定位轨迹

在应答定位抗多途模式下,询问信号为LFM,信号周期为8.192ms,信号频带为35~45kHz。利用应答器中接收到的询问信号的时间反转为载体,实现自适应的聚焦信道多途对定位阵元的影响,进而都达到均衡信道多途的作用,提高了水声定位的精度。因此,从图12和图13分析,由于采用抗多途的算法,轨迹野点明显减少,在未采用任何后置处理手段的条件下,定位系统的水平 xy 坐标相对普通

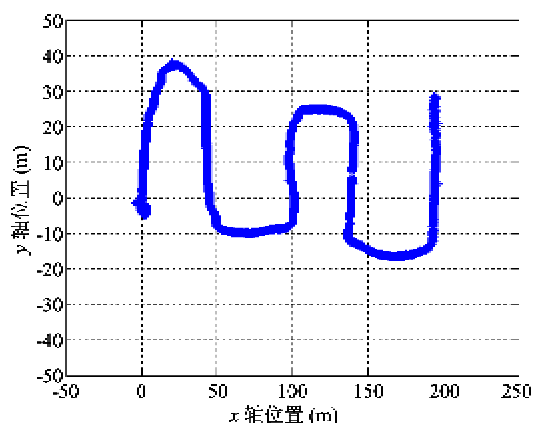


图12 应答抗多途干扰模式定位轨迹

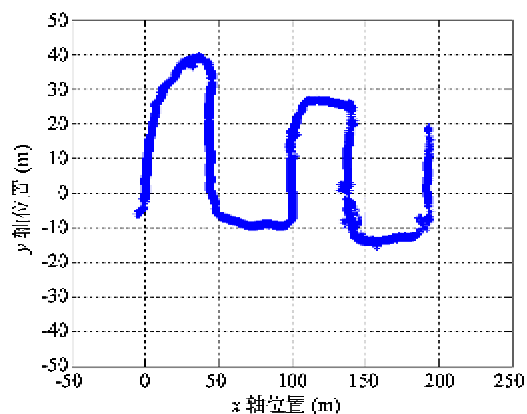


图13 信标抗多途干扰模式定位轨迹

方法来说野点减少,并且不存在任何间断点,其定位精度要优于普通模式。

5 结 论

本文论述了堤坝检测水下机器人水声定位技术的主要原理,针对堤坝检测机器人在定位过程中极易受到由水面、坝体等引起的多途干扰,致使定位解算轨迹产生误差等问题,提出一种利用时间反转技术抗多途干扰的方案。根据机器人采用信标或者应答定位工作模式,分别采用单阵元虚拟时间反转和主动时间反转技术抗多途干扰。仿真和湖试结果表明,采用虚拟时间反转信标模式及主动时间反转应答模式都可以聚焦信道多途,进而均衡信道的多途效应,改善了由多途干扰引起的解算轨迹产生的野点及间断点,提高了探坝水下机器人的定位精度。

参考文献

- [1] 王继胜,郭元曦,乔钢. 用于堤坝检测的剖面声纳系统实验研究. 海军工程大学学报,2007,19(4):33-37
- [2] 甘永,孙玉山,万磊. 堤坝检测水下机器人运动控制系统的研究. 哈尔滨工程大学学报,2005,26(5):84-86
- [3] 徐新盛,丁士圻.“超同步周期”水声定位技术与实现. 声学学报,1996,21(3):265-271
- [4] 丁士圻,徐新盛,王智远. 船载式远程高精度水声定位系. 海洋工程,1996,14(4):16-20
- [5] 付进,梁国龙,张光普. 界面反射对定位系统性能影响及应对策略研究. 兵工学报,2009 30(1):24-29
- [6] 惠娟,梁国龙. 组合定位抗距离模糊技术及性能分析. 哈尔滨工程大学学报,2007,28(6):665-668
- [7] Mathias F. Time-reversal of ultrasonic fields—Part I: basic principles. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr*, 1992,39(5):555-556
- [8] Prada C, Manneville S, Spoliansky D, et al. Decomposition of the time reversal operator: Detection and selective focusing on two scatterers, *J Acoust Soc Am*, 1996, 99(4), 2067-2076
- [9] Francois W, Jean-louis T, Mathias F. Time-reversal of ultrasonic fields—Part II: experimental results. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr*, 1992, 39(5):567-578
- [10] Hodgkiss W, Song H, Kuperman W, et al. Long range and variable focus Phase- conjugation experiment in shallow water. *J Acoust Soc Am*, 1999,105(3):1597-1604
- [11] Song H, Kuperman W, Hodgkiss W. Basin-scale time reversal communications. *J Acoust Soc Am*, 2009, 125(1), 212-217
- [12] Zachary J, Benjamin R, Harry J. Simpson Isolating scattering resonances of an air-filled spherical shell using iterative, single-channel time reversal. *J Acoust Soc Am*, 2012, 131(1): 318-326
- [13] Waters Z. Sensing resonant objects in the presence of noise and clutter using iterative, single-channel time reversal, [Ph. D dissertation]. Boston: Boston University, 2009
- [14] Pautet L, Tesei A, Guerrini P. Target echo enhancement using a single-element time reversal mirror. *IEEE J Ocean Eng*, 2005, 30(4):912-920
- [15] Zielinski A, Yoon Y H, Wu L. Performance analysis of digital acoustic communication in a shallow water. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*,1995, 20(4): 293-299

The research on anti-multipath-interference underwater acoustic positioning for dam inspection ROVs

Qiao Gang, Li Zhuang, Sun Zongxin

(National Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract

To overcome the multipath interference with underwater acoustic positioning for dam inspection ROVs caused by the water surface and the dam body, an anti-multipath-interference underwater acoustic positioning scheme using the time-reversal mirror (TRM) technology is proposed. When using the scheme, the time reversal takes advantage of rich scattering environments to achieve signal focusing, which enables the use of simple receiver structures without sacrificing performance. A single element virtual time reversal is applied to beacon mode, which achieves the time reversal by channel estimation in computer instead of ocean channel. A single element active time reversal is applied to transponder mode, which takes advantage of the heterogeneity of the medium to match the acoustic channel automatically without any transcendental knowledge. The results of computer simulations and lake trials show that using the time reversal focusing the channel multi-path characteristics can improve the precision of underwater vehicle positioning and navigation.

Key words: dam inspection, remote-operated vehicle (ROV), time reversal, underwater acoustic positioning, transponder, multipath interference