

doi: 10.3788/gzxb20174604.0406004

分布反馈式光纤激光水听器拖曳线列阵实验研究

唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 毛欣

(海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033)

摘 要: 为了进一步增大光纤拖曳阵的探测距离, 研制了缆径为 16 mm 的 32 元分布反馈式光纤激光水听器拖曳线列阵。阵元在 10~2 000 Hz 频率范围内的平均声压灵敏度为 -142.7 dB(re 1rad/ μ Pa), 波动幅度小于 ± 2 dB。基于声光调制器的时分、波分联合复用技术实现了 32 元光纤激光水听器的多路复用, 各个阵元之间以及各个通道之间的串扰均小于 -40 dB, 并完成了静态和动态拖曳湖上实验。实验结果表明, 研制的 32 元分布反馈式光纤激光水听器拖曳线列阵无论是在静态, 还是在 6~16 节的动态拖曳状态, 都能对目标形成稳定的波束指向, 与 GPS 轨迹记录完全一致, 展现了分布反馈式光纤激光水听器拖曳线列阵在工程上的应用前景。

关键词: DFB 光纤激光; 拖曳线列阵; 水听器; 多路复用; 波束成形

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)04-0406004-8

Experimental Research on DFB Fiber Laser Hydrophone Towed Line Array

TANG Bo, HUANG Jun-bin, GU Hong-can, MAO Xin

(Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: To further increase the detection distance of optical fiber array, a prototype of 32-element distributed feedback fiber laser hydrophone towed line array with a diameter of 16 mm is developed. The acoustic pressure sensitivity of the element reaches to -142.7 dB with the fluctuation less than ± 2 dB in a frequency range of 10~2 000 Hz. Based on the time division, wavelength division multiplexing technology and acoustic optic modulator, 32-element fiber laser hydrophone array multiplexing is realized. The crosstalk between each element and each channel are both less than -40 dB. The static and dynamic towed tests on the lake are completed. The distributed feedback fiber laser hydrophone towed line array can form stable beam pointing to the target in both the static and dynamic towed state of 6~16 knots, which is the same as the GPS record. The application prospect in engineering of the distributed feedback fiber laser hydrophone towed line array is demonstrated.

Key words: DFB fiber laser; Towed line array; Hydrophone; Multiplexing; Beam forming

OCIS Codes: 060.2770; 060.2340; 060.3735; 230.1040

0 引言

在过去的 20 年里, 干涉型光纤水听器由于其高灵敏度、抗电磁干扰以及便于大规模复用等优点, 成为比压电型水听器更具发展前景的水声探测设备^[1-2]。然而, 随着分布反馈式(Distributed Feed Back, DFB)光纤激光器的出现, 以它为传感单元的水听器在保持较高灵敏度的同时, 其尺寸更小, 封装结构更简单, 因而为构建超细缆径的光纤拖曳线列阵提供了新的技术途径^[3-5]。

近年来, 出现了许多不同封装结构的 DFB 光纤激光水听器阵元, 其声压灵敏度、频响特性、动态范围以及抗加速度等水声性能都得到不断完善, 因而研究的重点逐渐向阵列方向倾斜^[6-7]。2007 年, 黄俊斌等成功

基金项目: “十二五”装备预先研究项目和武器装备探索研究重大项目资助

第一作者: 唐波(1991-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术, Email: 942896945@qq.com

导师: 黄俊斌(1965-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术, Email: tsy98@163.com

收稿日期: 2016-12-02; 录用日期: 2017-01-10

<http://www.photon.ac.cn>

进行了4元、缆径为20 mm的DFB光纤激光水听器拖曳阵的湖上试验,能够捕捉到目标信号,验证了该技术路线的可行性,在此基础上,2009年,在莫干山水库对4元、缆径仅为16 mm的DFB光纤激光水听器拖曳阵开展了湖上静态与动态拖曳试验,都能发现目标并进行正确跟踪,虽然对目标形成的波束宽度较宽但比较稳定^[8].2012年,张文涛等构建了功率差异小于5 dB的8元DFB光纤激光水听器拖曳线列阵,并在千岛湖开展了试验研究,由于水听器之间的一致性不理想,对目标的波束成形虽然稳定,但信噪比不高,之后还对拖曳阵的流噪声进行了测试^[9-10].2013年,澳大利亚 Foster 等在 Adelaide 海湾对8元DFB光纤激光水听器拖曳阵进行了海上试验,试验表明阵列在500~2 000 Hz频段内的最小可探测声压接近零级海况,指标达到了实际应用要求^[11].然而,对于拖曳阵的工程化应用,DFB光纤激光水听器阵元的数量需要进一步增加,以提高对目标信号的信噪比来实现更远距离的探测.

本文设计制作了32元、缆径为16 mm的DFB光纤激光水听器拖曳线列阵,基于声光调制器的时分、波分联合复用技术实现了32元光纤激光水听器的多路复用,并在千岛湖实验场完成了静态和动态拖曳实验,水听器阵列的波束成形稳定,且信噪比较高,对于推动DFB光纤激光水听器拖曳线列阵的工程化应用具有重要意义.

1 DFB 光纤激光水听器阵元

DFB光纤激光水听器的套筒沿径向均布四个长条形透声孔,光纤激光器张紧后通过套筒两端的聚氨酯固定于其中轴线上,激光器的尾纤从套筒两端拧入端盖的中孔穿出,如图1所示,该水听器的长度为95 mm,外径为13 mm.套筒上的穿缆通孔可穿过多芯光缆,使其能向后扩展阵元数,而套筒上的固定线槽可将水听器固定在拖曳阵中的Kevlar绳上,起到抗震作用,这些都为构建光纤激光拖曳线列阵奠定了基础^[12-13].

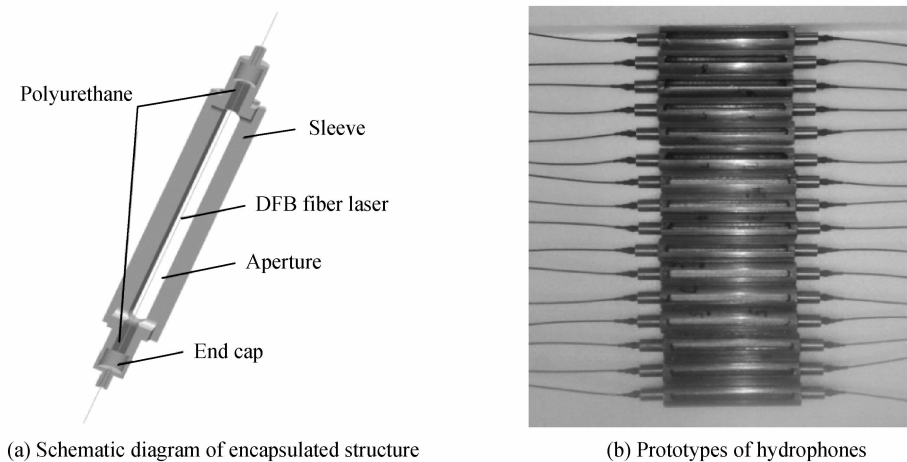


图1 DFB 光纤激光水听器拖曳阵阵元

Fig. 1 DFB fiber laser hydrophone towed line array element

如图2所示,在10~2 000 Hz的频率范围内,DFB光纤激光水听器拖曳阵阵元的平均声压灵敏度为一142.7 dB(re 1rad/ μ Pa),起伏幅度在 ± 2 dB以内.

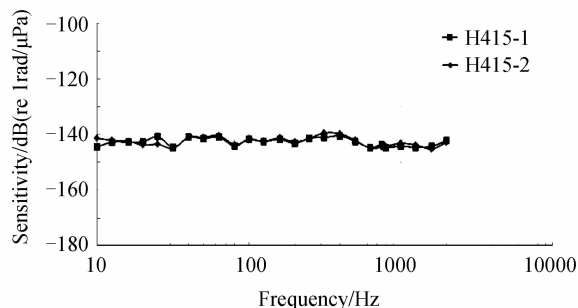


图2 DFB 光纤激光水听器实验频响曲线

Fig. 2 Experimental frequency response curve of DFB fiber laser hydrophone

2 DFB 光纤激光水听器拖曳阵

DFB 光纤激光水听器拖曳线列阵结构如图 3 所示,主要由拖缆、阵列段和尾绳组成,阵列段包括前隔振段、声学段和后隔振段.阵列前段为多芯拖曳光缆,缆径为 8 mm,拖缆与阵列段之间采用一体化连接,避免了在较小空间内处理大量光纤熔接点的难题.阵列段为内置 DFB 光纤激光水听器阵列的聚氨酯塑料软管,壁厚 2 mm,内部充满了轻质油,前隔振段和后隔振段均长 20 m,声学段长 32 m,阵列段设计工作拉力 100 kg. DFB 光纤激光水听器在拖曳阵内的固定方式如图 4 所示, Kvelar 绳从水听器套筒外侧的固定线槽穿过并注胶固定,保证各阵元之间的间距稳定,而多芯光缆从水听器套筒上的穿缆通孔穿过,以实现对所有水听器阵元信号的传输,都没有进一步占用拖曳阵内部的空间,这些在成缆工艺上的设计都是研制出缆径仅为 16 mm 的超细缆径大规模 DFB 光纤激光水听器拖曳线列阵的保证.

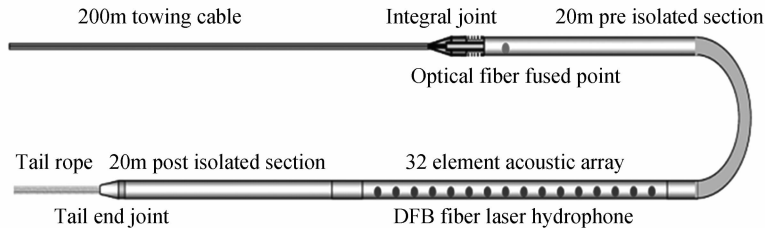


图 3 DFB 光纤激光水听器拖曳阵结构图

Fig. 3 Sketch of DFB fiber laser hydrophone towed line array structure

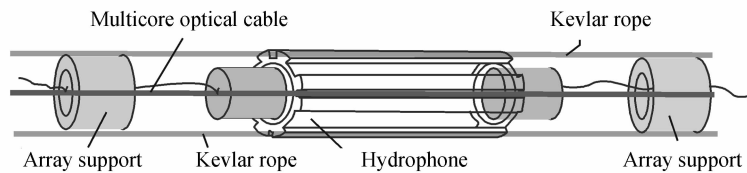


图 4 DFB 光纤激光水听器阵内固定方式

Fig. 4 Internal fixation of DFB fiber laser hydrophone array

基于声光调制器的时分、波分联合复用技术实现了 32 元光纤激光水听器的多路复用,如图 5 所示,980 nm 泵浦光经过隔离器后,由宽带耦合器将光源分成 4 路,每一路经耦合器后泵浦在一根串接 8 元不同波长的 DFB 光纤激光水听器,各路光纤水听器喷射出来的激光经隔离器后通过由定时器控制的声光调制开关,开关对激光信号进行选通即实现时分复用,各路选通出的信号进入宽带耦合器合为一路信号,在进行解波分复用之前通过掺铒光纤放大器进行光放大,放大后的光信号进入干涉仪,经干涉后的信号进入解调系统以得到不同波长的水听器中包含的水声压信息.

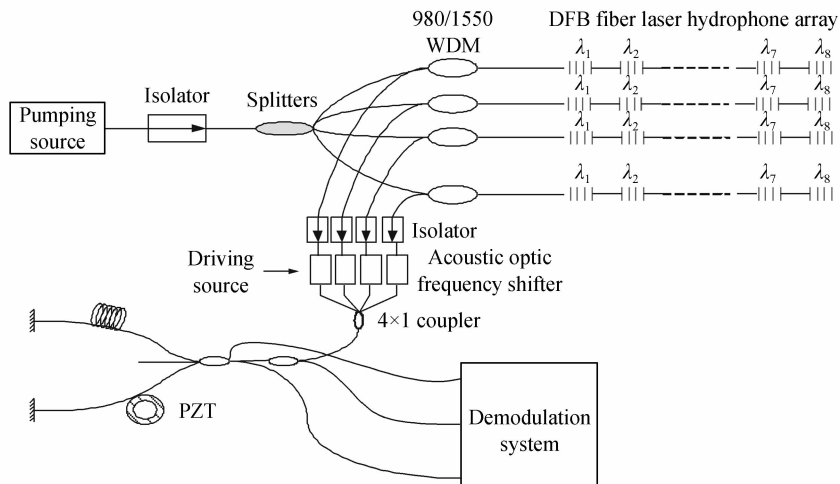


图 5 DFB 光纤激光水听器拖曳阵多路复用系统

Fig. 5 DFB fiber laser hydrophone towed line array multiplexing system

将系统的1、2、3、4通道分别接入单个DFB光纤激光水听器,光信号经声光调制器后接光放大器,再经干涉仪干涉后接探测器.与1通道连接的水听器置于水箱中,施加5 kHz的水声信号,其他3个通道的水听器进行水声隔离,得到4支水听器的解调信号的功率密度谱如图6所示,第1通道光纤激光水听器对第2通道、第3通道和第4通道的串扰都小于-40 dB.

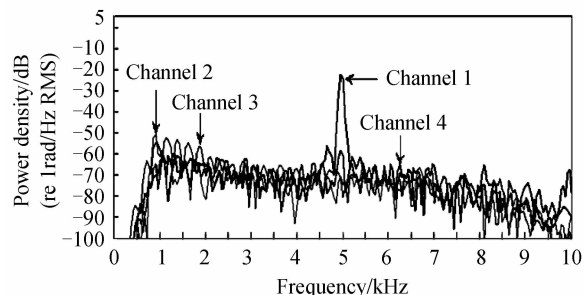


图6 DFB光纤激光水听器解调信号的功率密度谱

Fig. 6 Power density spectrum of the demodulation signal of DFB fiber laser hydrophone

将系统的1通道串接8个不同波长的DFB光纤激光水听器,将其中一个水听器置于水箱中,其他不受水声信号的作用.水声换能器的驱动信号的频率为5 kHz,电压峰峰值调制幅度为20 V时,水箱中水听器的解调输出功率谱密度如图7所示.

同时测量其他7个水声隔离的DFB光纤激光水听器解调输出信号的功率谱,其中激光工作波长为1 544 nm的光纤激光水听器输出信号功率谱如图8所示.

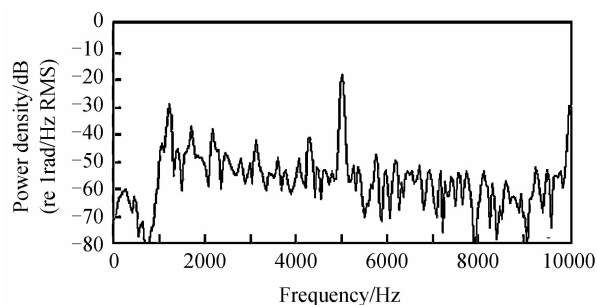


图7 声压作用下DFB光纤激光水听器的输出功率密度谱
Fig. 7 Output power density spectrum of DFB fiber laser hydrophone under pressure

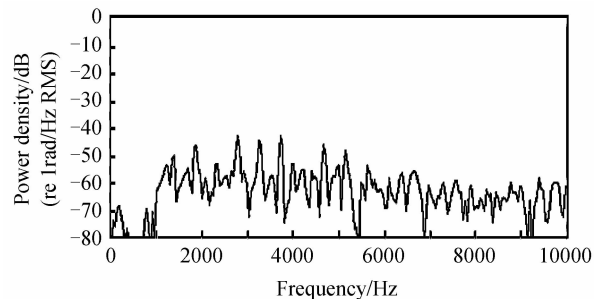


图8 无声压作用的DFB光纤激光水听器的输出功率密度谱
Fig. 8 Output power density spectrum of DFB fiber laser hydrophone without pressure

图7中作用于光纤激光水听器的声压功率谱级大于-20 dB,图8中的功率谱级约为-60 dB,其他工作波长的光纤激光水听器输出信号的功率谱与图7相比没有明显变化,表明串扰级小于-40 dB,而对其他水听器单独施加声压作用时,测试结果与之相同.

因此,使用高消光比的声光调制器作为开关器件,DFB光纤激光水听器时分、波分联合复用方案可以成功地实现多路光纤激光水听器的时分、波分联合复用,且时分、波分复用相邻通道串扰级都小于-40 dB.

3 实验分析

3.1 静态实验

如图9所示,DFB光纤激光水听器拖曳线阵通过浮球悬浮于水中10 m深,水听器阵列入水后,在声

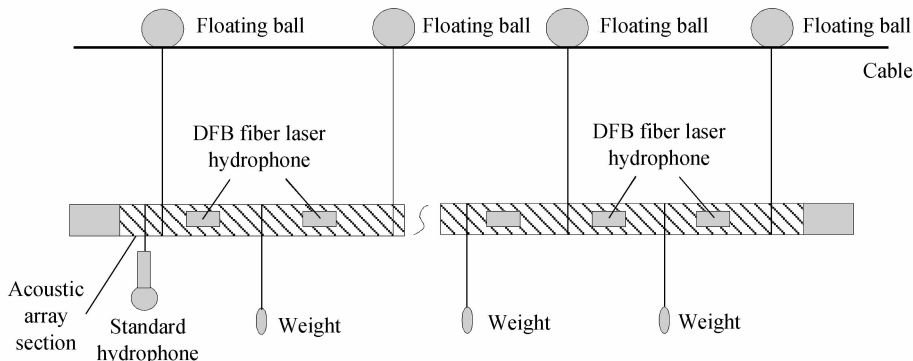


图9 DFB光纤激光水听器拖曳线阵静态测试布置

Fig. 9 DFB fiber laser hydrophone towed line array static test layout

阵段的每个抗震支撑处吊放一个重物,将阵列拉直以保证姿态,标准水听器靠近阵列放置.实验过程中,发射换能器入水深度为 10 m,小渔船携带发射换能器静止或者沿一定轨迹航行作为目标,发射换能器分别发射 750 Hz 的单频连续信号和 600~1 000 Hz 的宽带噪声信号,测试水听器阵列的静态性能.

首先,将发射换能器吊放于水下 10 m,距 DFB 光纤激光水听器线列阵垂直距离为 371 m,发射 750 Hz 单频连续信号,波束成形结果如图 10 所示,主瓣宽度为 3.5° ,旁瓣级 -12.8 dB.

然后,将发射换能器吊放于水下 10 m,由小船拖动,发射 750 Hz 单频连续信号,小船从远处驶近至距离阵列 300 m 处,总航行距离 280 m,平均速度 2.2 km/h,波束成形结果如图 11,主瓣宽度为 4.4° .

为了使得测量方位的变化更为明显,小船拖着发射换能器沿着与阵列基本平行的方向运动,距离阵列 460 m,运动距离为 430 m,换能器发射 600~1 000 Hz 的宽带噪声信号,波束成形结果如图 12 所示,主瓣宽度为 2.7° ,表明宽带噪声信号比单频连续信号在波束成形时具有更窄的波束宽度.

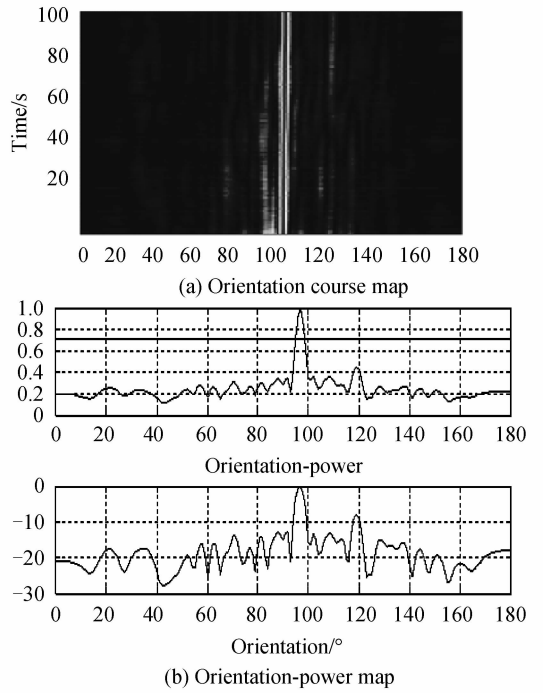


图 10 发射 750 Hz 信号时阵列的方位历程图和方位-功率图
Fig. 10 Orientation course map of the array when the transmitting frequency is 750 Hz

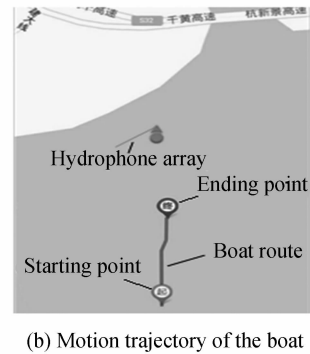
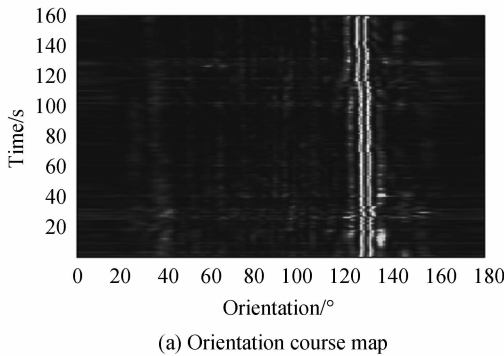


图 11 发射 750 Hz 信号时阵列方位历程图及小船运动路线

Fig. 11 Orientation course map of the array and the motion trajectory of the boat when the transmitting frequency is 750 Hz

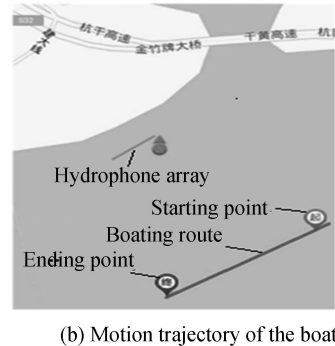
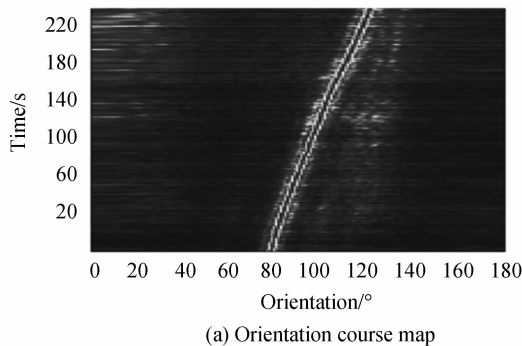


图 12 发射 600~1 000 Hz 信号时阵列方位历程图及小船运动路线

Fig. 12 Orientation course map of the array and the motion trajectory of the boat when the transmitting frequency is 600~1 000 Hz

3.2 动态拖曳实验

动态拖曳实验系统布局如图 13 所示,卷扬机及其 kevlar 绳安装在试验母船上,工作小船上装了解调和记录设备,供电设备等.实验时,首先将 kevlar 绳系在工作小船的船艏,工作小船和拖曳木船之间有工作小船船艏固定的水听器阵列的尾绳和承重尼龙绳相连,其中承重尼龙绳承力拖动工作小船,水听器阵列的尾绳保证阵列不拖底,然后由拖曳木船拖曳工作小船到就位点.

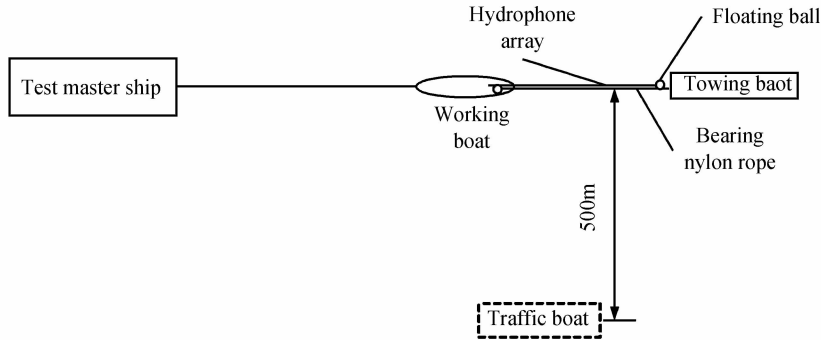


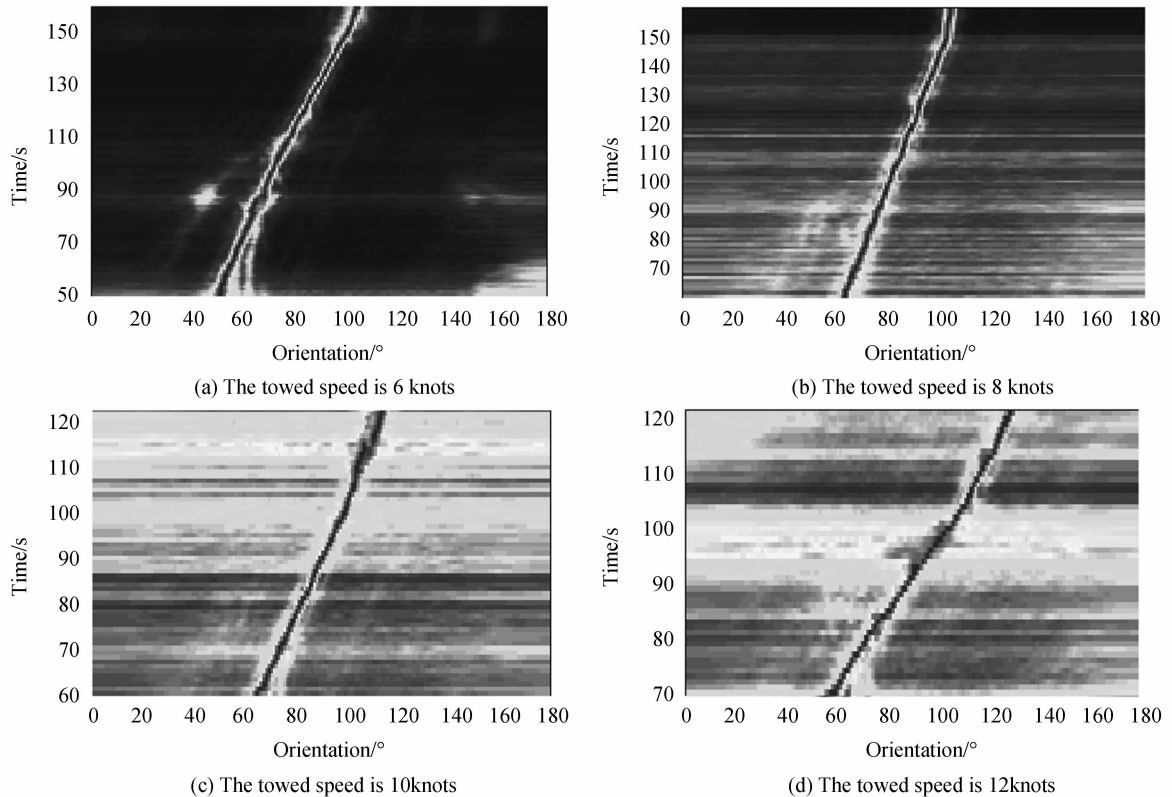
图 13 DFB 光纤激光水听器拖曳阵动态拖曳实验布局

Fig. 13 DFB fiber laser hydrophone towed line array dynamic towed test layout

拖曳前,工作小船松开承重尼龙绳,而后拖曳木船松开阵列尾绳,交通艇发射 600~1 000 宽带噪声.卷扬机启动,通过 kevlar 绳将船艏拖着阵列的工作小船以一定的速度拖回,同时带动 DFB 光纤激光水听器拖曳阵,当达到一定速度时,阵列在水下一定深度被拉直,在拖曳过程中工作小船处理、存储水听器阵列接收到的信号,当拖曳速度为 6~16 节时的波束成形结果如图 14 所示.

实验结果表明,研制的 32 元光纤激光水听器拖曳线列阵无论是在静态,还是在 6~16 节的动态拖曳状态,都能发现目标并进行正确跟踪,对目标形成稳定的波束指向,与 GPS 轨迹记录完全一致,对于推动基于 DFB 光纤激光水听器的拖曳线列阵的工程化应用起到了重要作用.

对比图 12 与图 14 可知,在动态拖曳试验中的启动与停止阶段,DFB 光纤激光水听器拖曳阵的输出信噪比较低,该现象在中间的匀速拖曳阶段以及静态试验中并不明显,表明拖曳阵在启动与停止阶段相对较大



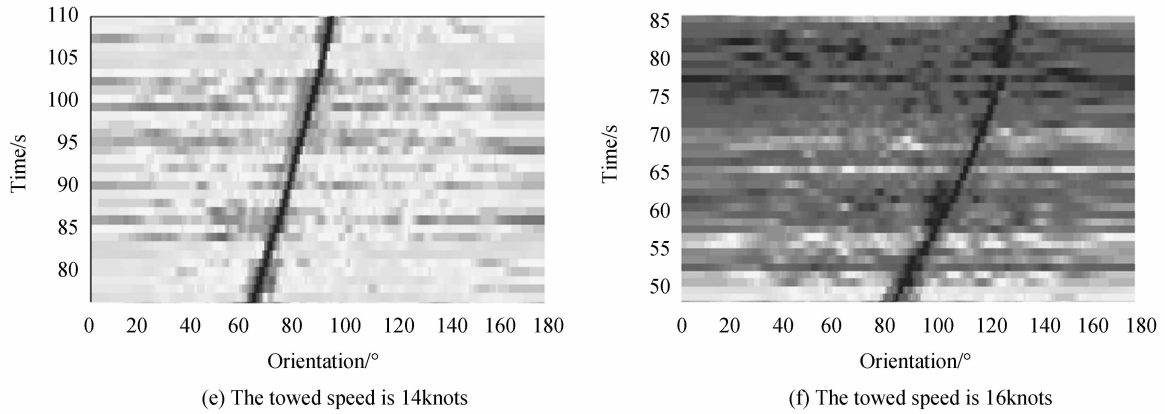


图 14 DFB 光纤激光水听器阵列动态拖曳方位估计
Fig. 14 DFB fiber laser hydrophone array dynamic towed bearing estimation

的加速度效应引入了对阵列性能影响较大的噪声,由于拖曳阵的阵元采用的是聚氨酯端面拉伸式增敏结构的 DFB 光纤激光水听器,水听器两端的聚氨酯很难保证尺寸完全相同,固化过程的不可精准控制也会造成聚氨酯的材料参量存在区别,以至于水听器采用的对称化设计的加速度去敏效果并不理想,因而在动态拖曳试验中阵列对加速度的敏感性影响了其对声压信号的探测,水听器阵元的抗加速度性能有待进一步提高。

图 15 为中科院半导体所研制的 8 阵元 DFB 光纤激光水听器拖曳阵在 2.5 节动态拖曳速度下,阵列对目标的方位历程图,对比图 14 与图 15 可知,8 元拖曳阵虽然能对目标形成稳定的波束指向,但是波束宽度比 32 元拖曳阵宽一半以上,且由于阵元之间的一致性不理想,阵列在低速拖曳状态下的信噪比不高,因而形成固化的、一致性较好的水听器封装工艺,进一步扩大阵列规模能有效提高阵列的探测准确度与探测距离。

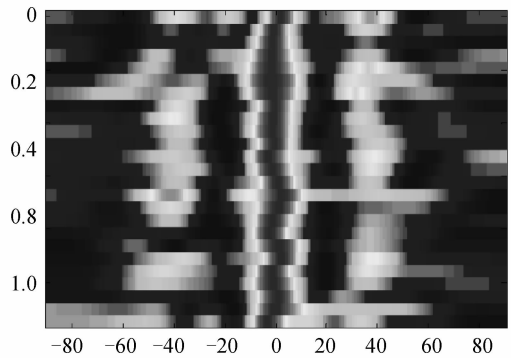


图 15 8 元 DFB 光纤激光水听器阵列动态拖曳方位估计
Fig. 15 8-element DFB fiber laser hydrophone array dynamic towed bearing estimation

4 结论

以长度为 92 mm,外径为 13 mm 的聚氨酯端面拉伸式增敏结构的 DFB 光纤激光水听器为阵元,研制了缆径为 16 mm 的 32 元光纤拖曳线列阵,并对其开展了静态和动态拖曳湖上实验,都能对目标形成稳定的波束指向,还原测量目标的运动轨迹,为构建大规模 DFB 光纤激光水听器拖曳线列阵提供了可行的技术途径,以此为基础继续增加阵元数量,改善阵元的抗加速度性能,可提高阵列的输出信噪比,从而进一步增大阵列的探测距离。DFB 光纤激光水听器在水声探测领域极具应用前景。

参考文献

- [1] YUN Chao-qing, LUO Hong, HUANG Zheng-liang, *et al.* Fiber optic hydrophone used for thin line towed array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12): 1206004.
运朝青,罗洪,胡正良,等. 应用于拖曳线列阵的光纤水听器研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(12): 1206004.
- [2] ZHANG Wen-tao, LI Fang. Recent progresses in fiber laser hydrophone[J]. *Journal of Integration Technology*, 2015, **11**(6): 1-12.
张文涛,李芳. 光纤激光水听器研究进展[J]. *集成技术*, 2015, **11**(6): 1-12.
- [3] TAN Bo, HUANG Jun-bin, HE Lin, *et al.* A study on the dynamical characteristics of distributed feedback fiber laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(8): 1832-1838.
谭波,黄俊斌,何琳,等. 分布反馈式光纤激光器的动态特性[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(8): 1832-1838.
- [4] LI Dong-ming, CHEN Jun, GE Hui-liang, *et al.* Research of high sensitivity and anti-acceleration of DFB active fiber grating hydrophone[J]. *Chinese Journal of Lasers*. 2012, **39**(3): 0305005.
李东明,陈军,葛辉良,等. 高灵敏度加速度抵消型分布反馈有源光纤光栅水听器研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3):

- 0305005.
- [5] TANG Bo, HUANG Jun-bin, GU Hong-can, *et al.* Prestressing force in DFB fiber laser hydrophone: theory and experiment[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(3): 0305005.
唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. DFB 光纤激光水听器预应力理论与实验研究[J]. 中国激光, 2016, **43**(3): 0305005.
- [6] GOODMAN S, FOSTER S, VELZEN J V, *et al.* Field demonstration of a DFB fiber laser hydrophone seabed array in Jervis Bay, Australia[C]. SPIE, 2009, **7503**: 75034L.
- [7] KUTTAN C U, PALLAYIL V, MENG L K, *et al.* Flow noise response of a diaphragm based fiber laser hydrophone array[J]. *Ocean Engineering*, 2014, **91**: 235-242.
- [8] HUANG Jun-bin, GU Hong-can, TAN Bo, *et al.* Experimental study on the fiber grating hydrophone towing array via dynamical towing in the lake[J]. *Torpedo Technology*, 2007, **15**(2): 45-47.
黄俊斌, 顾宏灿, 谭波, 等. 光纤光栅水听器拖曳线列阵湖上动态拖曳试验研究[J]. 鱼雷技术. 2007, **15**(2): 45-47.
- [9] ZHANG Wen-tao, LI Fang, LIU Yu-liang, *et al.* Field test of an eight-element fiber laser hydrophone array[C]. SPIE, 2012, **8421**: 8421AX.
- [10] ZHANG Wen-tao, HUANG Wen-zhu, LUO Ying-bo, *et al.* Field test of the flow noise of fiber laser hydrophone array [C]. SPIE, 2014, **9157**: 91579P.
- [11] FOSTER S, TIKHOMIROV A, HARRISON J, *et al.* Field demonstration of an 8-element fiber laser hydrophone array[C]. SPIE, 2014, **9157**: 91570H.
- [12] TANG Bo, HUANG Jun-bin, GU Hong-can, *et al.* DFB fiber laser hydrophone used in towed line array[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(5): 0505005.
唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 应用于拖曳线列阵的分布反馈式光纤激光水听器研究[J]. 中国激光. 2016, **43**(5): 0505005.
- [13] LIU Meng-ran, JIAN Ze-ming, ZHANG Guo-jun, *et al.* Fluid-structure interaction of MEMS vector hydrophone in packing processing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(5): 1387-1393.
刘梦然, 简泽明, 张国军, 等. MEMS 矢量水听器封装的流体-结构相互作用[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(5): 1387-1393.