

# 激光与光电子学进展

## 光纤水听器技术的研究进展

孟洲\*, 陈伟, 王建飞, 胡晓阳, 陈默, 路阳, 陈羽, 张一弛

国防科技大学气象海洋学院, 湖南长沙 410073

**摘要** 光纤水听器(FOH)作为一种新型水声传感器,可应用于水下目标探测、石油天然气勘探、地震检测等军事和民用领域。随着海洋背景噪声的增大和水下目标降噪水平的提高,人们对FOH的性能要求也越来越高。因此,从FOH的主要发展方向、关键技术、新型FOH三个层面介绍了FOH技术,包括大规模FOH阵列、甚低频探测、深海远程传输、拖曳细线阵、窄线宽激光器、信号处理、光纤矢量水听器和分布式FOH等方面,对于FOH系统的理论研究和实际应用具有一定的指导意义。

**关键词** 光纤光学; 光纤矢量水听器; 细线拖曳阵; 分布式光纤水听器; 深海远程传输

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1306009

### Research Progress of Fiber Optic Hydrophone Technology

Meng Zhou\*, Chen Wei, Wang Jianfei, Hu Xiaoyang, Chen Mo, Lu Yang, Chen Yu,  
Zhang Yichi

*College of Meteorology and Oceanology, National University of Defense Technology, Changsha,  
Hunan 410073, China*

**Abstract** Fiber optic hydrophone (FOH) is a new type of underwater acoustic sensor, which can be used in both military and civilian fields such as underwater target detection, oil and natural gas prospecting, and earthquake inspection. With the increase of ocean ambient noise and the development of noise suppression techniques for the underwater targets, people's demand for high-performance FOH is becoming more and more urgent. Therefore, this article introduces FOH technology from three aspects, including main development trends, key technologies and new-type FOH. In detail, large-scale FOH array, very low frequency detection, deep-sea and long-haul transmission, towed linear array, narrow-linewidth laser, signal processing, fiber optic vector hydrophone and distributed FOH are introduced. This research has certain guiding significance for the theoretical research and practical application of FOH system.

**Key words** fiber optics; fiber optic vector hydrophone; towed linear array; distributed fiber optic hydrophone; deep-sea long-haul transmission

**OCIS codes** 060.2370; 230.1150; 280.4788

## 1 引言

光纤水听器(FOH)是建立在光纤和光电子技术基础上、以光纤同时作为信息传输和传感媒介的

一种新型水声传感器,在水下目标探测、石油天然气勘探、地震检测等军事和民用领域都具有重要应用。FOH具有灵敏度高、动态范围大、抗电磁干扰能力强、结构灵巧、易于大规模成阵等特点,且能适

收稿日期: 2021-04-13; 修回日期: 2021-05-26; 录用日期: 2021-06-09

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405503)、国家自然科学基金(61775238, 61901488)

通信作者: \*zhoumeng6806@163.com

用于多种恶劣环境中,因此,产生了岸基阵、拖曳阵、舷侧阵、潜/浮标等多种应用形式<sup>[1]</sup>,成为现代光纤传感技术和水声传感技术的重要发展方向。鉴于 FOH 在军事和民用领域的巨大应用价值,自 1977 年美国海军研究实验室(NRL)首次发表关于 FOH 的论文以来<sup>[2]</sup>,多个发达国家便积极开展了 FOH 的研究和开发<sup>[3-30]</sup>。我国对 FOH 的研究虽然起步较晚<sup>[31]</sup>,但自 20 世纪 90 年代以来,也相继突破了从基础理论到实际应用的一系列关键技术<sup>[32-53]</sup>。

近年来,海上航运和海底开采活动日益频繁,导致海洋背景噪声越来越严重;且随着水下目标降噪水平的提升,其辐射噪声水平已低于海洋背景噪声,这给水下目标探测带来了很大的困难,也给 FOH 技术提出了更高的要求。为了提升系统对水下目标的探测能力,需对 FOH 进行大规模成阵,因此,人们广泛研究了包括空分复用、波分复用、时分复用在内的各种复用及成阵技术。由于水下目标的辐射噪声逐渐向甚低频集中,而该频段恰好是海洋背景噪声最严重的区域,使 FOH 的甚低频探测成为亟待解决的问题。随着 FOH 技术向深远海方向的发展,FOH 的耐深水压和远距离传输的非线性效应问题日益凸显,从而推动了深海远程传输技术的发展。FOH 细线拖曳阵可应用于一些体积受限的水下平台,也受到了人们的广泛关注。此外,FOH 系统的本底噪声决定了其检测灵敏度,而系统所用光源的相位噪声是本底噪声的主要来源,后续信号处理也会影响 FOH 系统的本底噪声,因此,研究低噪声超窄线宽激光器以及信号检测和水声信号处理技术具有重要意义。本文对 FOH 的具体应用需求及相关技术进展进行了整理总结,并分析了新型 FOH 技术及其应用。其中,光纤矢量水听器(FOVH)可同时获得声场的标量与三维矢量信息,而分布式 FOH 具备空间连续拾取水下声信号的能力,为 FOH 技术的发展注入了新的活力。

## 2 光纤水听器的主要发展方向

近年来,FOH 在军事和民用领域的应用越来越广泛,给 FOH 技术的发展带来了重要的牵引作用,推动着 FOH 朝大规模成阵、甚低频探测、深远海传输、细线拖曳阵等方向快速发展。

### 2.1 大规模光纤水听器阵列

传统 FOH 是没有指向性的,只有将其组成 FOH 阵列并利用波束形成方法,才能获得水下目标

的方位信息。FOH 阵列的规模越大,对目标的定向精度就越高。扩大 FOH 阵列的规模可以有效提高信号的空间信噪比(SNR)增益,增加水下目标的探测距离。但随着阵列规模的扩大,FOH 系统中使用的光纤耦合器、波分复用器、解波分复用器等光学器件也逐渐增多,导致光的传输损耗大幅度增加,最终影响系统的探测能力。因此,FOH 的大规模成阵是需要综合设计的一项关键技术。

国内外研究机构对大规模 FOH 系统进行了相关研究<sup>[54-65]</sup>。1990 年,NRL 研发了 48 通道的全光拖曳阵列<sup>[66]</sup>。2003 年,美国弗吉尼亚级核潜艇下水,其配备了由 2700 个 FOH 组成的舷侧阵,如图 1 所示<sup>[7,67]</sup>。该系统可实现大范围的被动声探测,标志着 FOH 阵列进入了一个新阶段。挪威 Optoplan 公司在其北部海域布放了一条 16000 基元的 FOH 阵列,其结构如图 2 所示<sup>[27,68]</sup>。将该系统用于相关海



图 1 弗吉尼亚级核潜艇的实物图<sup>[7,67]</sup>

Fig. 1 Physical image of the Virginia-Class Nuclear submarine<sup>[7,67]</sup>

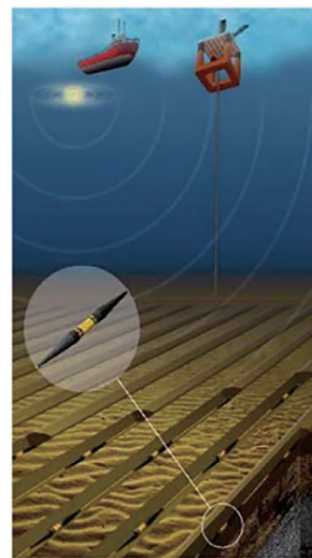


图 2 FOH 阵列的实物图<sup>[27]</sup>

Fig. 2 Physical image of the FOH array<sup>[27]</sup>

域石油储层的长期监测,可监测的海域达  $60 \text{ km}^2$ ,是目前世界上最大规模的光纤传感网络<sup>[68]</sup>。Liao等<sup>[62]</sup>报道了一种采用时分复用和密集波分复用的超大规模 FOH 系统,理论上可在单根光纤中实现 4096 路复用,代表了当时世界上最高效的 FOH 复用水平。郝小柱等<sup>[65]</sup>研发了可用于科学研究的 1024 基元大规模 FOH 阵列。利用光纤宽频带信息传输的特点,采用多重时分复用、密集波分复用和大量空分复用等混合复用方式,同时优化系统结构,可将 FOH 阵列系统扩展至数千基元规模,从而在拓展其应用领域的同时提升系统的探测性能。

## 2.2 甚低频光纤水听器

水下目标噪声主要集中在 100 Hz 以下的甚低频中,且相比高频段噪声,甚低频噪声更难得到抑制;同时,甚低频噪声信号在水中的损耗更小,传输距离更远。因此,甚低频水声噪声是水下目标的主要噪声来源,甚低频 FOH 也成为水下目标探测的重点发展方向。

Goodman等<sup>[69]</sup>利用光纤激光水听器在 40~1000 Hz 频段获得了 110 dB(re Hz/Pa,表示以 1 Hz/Pa 为基准值转化的单位 dB)的灵敏度,但其在低于 40 Hz 频段的灵敏度较低。NRL 基于分布反馈式 (DFB) 光纤激光器的 FOH 在 100~5000 Hz 频段取得了 107 dB(re Hz/Pa)的灵敏度,该结果与理论预测值的吻合程度较高,但对于甚低频段 (30~100 Hz) 的响应只进行了理论分析<sup>[70]</sup>。Plotnikov等<sup>[71]</sup>报道了一种应用于拖曳阵的 FOH,其响应频段为 20~495 Hz,但频率响应不够平坦。Li等<sup>[72]</sup>基于 DFB 光纤激光研制的 FOH 在 10~10000 Hz 频段可获得 115 dB(re Hz/Pa)的灵敏度,甚低频探测能力得到了显著提升。高侃等<sup>[73]</sup>公开了一种新型 FOH 声敏结构及实现方法,采用聚氨酯整体灌封 FOH,其声压灵敏度在 20~200 Hz 区间可从  $-146 \text{ dB (re rad}/\mu\text{Pa)}$  提升至  $-126 \text{ dB (re rad}/\mu\text{Pa)}$ 。郭振等<sup>[74]</sup>提出了一种外径为 20 mm 的 32 基元光纤布拉格光栅 (FBG) 水听器阵列,阵列中各基元在 20~2000 Hz 范围内的平均声压灵敏度为  $-143.9 \text{ dB (re rad}/\mu\text{Pa)}$ 。Zhang等<sup>[75]</sup>提出了一种 FOH,在 40~4000 Hz 范围内的平坦声压灵敏度为  $9 \times 10^{-3} \text{ pm/Pa}$ 。国防科技大学在甚低频干涉型 FOH 方面也进行了大量研究,其研发的甚低频干涉型 FOH 探头结构如图 3 所示。该 FOH 的频率响应曲线如图 4 所示,其在 10~2000 Hz 频段可获得  $-116 \text{ dB (re rad}/\mu\text{Pa)}$  的灵敏度。该 FOH 的系统

相位噪声约为  $-102 \text{ dB@100 Hz (re rad}/\text{Hz}^{1/2})$ ,如图 5 所示,相应的等效噪声声压为  $14 \text{ dB@100 Hz (re } \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2})$ 。该等效噪声声压远小于海洋背景噪声,这表明该甚低频 FOH 在水下目标探测方面具有重大的应用前景。



图 3 甚低频干涉型 FOH 探头的结构

Fig. 3 Structure of a very low frequency interference FOH probe

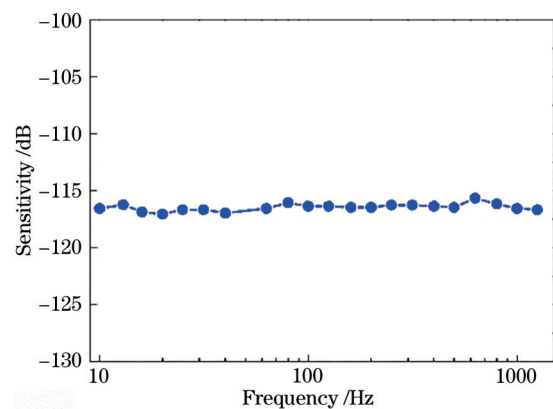


图 4 甚低频干涉型 FOH 频率响应

Fig. 4 Frequency response of a very low frequency interferometric FOH

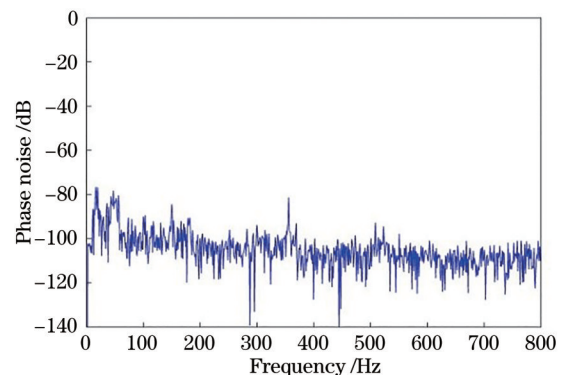


图 5 甚低频干涉型 FOH 系统相位噪声

Fig. 5 Phase noise of a very low frequency interferometric FOH system

### 2.3 深海与远程传输

可靠声路径是深海环境中特有的一种理想声信道,通常出现在完全深海声道环境中,具有声传输损耗小、背景噪声低等特点。可靠声路径通常存在于临界深度以下,海深值达到 4~5 km。将 FOH 布放在可靠声路径中,可利用其优良的信道特性探测远距离浅源目标,因此,研究适用于深海环境的 FOH 具有重要意义。近期,国防科技大学研制的 FOH 与 FOVH 均通过了 66 MPa 压力测试,可应用于超过 6 km 的深海环境。

掺铒光纤放大器(EDFA)与光纤拉曼放大器(FRA)技术的发展促进了光纤通信网络的发展,使远程 FOH 的设计成为可能。多个研究机构对远程 FOH 系统进行了研究<sup>[53,76-80]</sup>,Eriksrud<sup>[68]</sup>构建的中继

传输 FOH 系统传输距离达到 200 km。Austin 等<sup>[59]</sup>构建了 500 km 中继传输 FOH 系统。Cao 等<sup>[81]</sup>研制了 400 km 中继传输的 FOH 阵列,其系统结构如图 6 所示,其中, $\omega_m$ 为调制频率, $S_1 \sim S_{16}$ 为 16 个不同的探头, $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 为 2 个不同的波长,AGD 为自动增益控制模块,TDM 为时分复用器,OAM 为光合束,ODM 为光分束,LA 为在线放大器,BA 为功率放大器,Ch 为通道,D/A<sub>1</sub>和 D/A<sub>2</sub>为 2 个数模转换模块,FPGA 为现场可编程逻辑门阵列,PGC 为相位产生载波,WDM 为波分复用器,DWDM 为解波分复用器,AOM 为声光调制器,TTL 为逻辑电平,D 为光探测器,IIC 为集成电路总线。在传输光纤部分每隔 100 km 采用一个 EDFA 作为中继对光功率进行补偿,系统的相位噪声为  $-90 \text{ dB}(\text{re rad}/\text{Hz}^{1/2}@1 \text{ kHz})$ 。

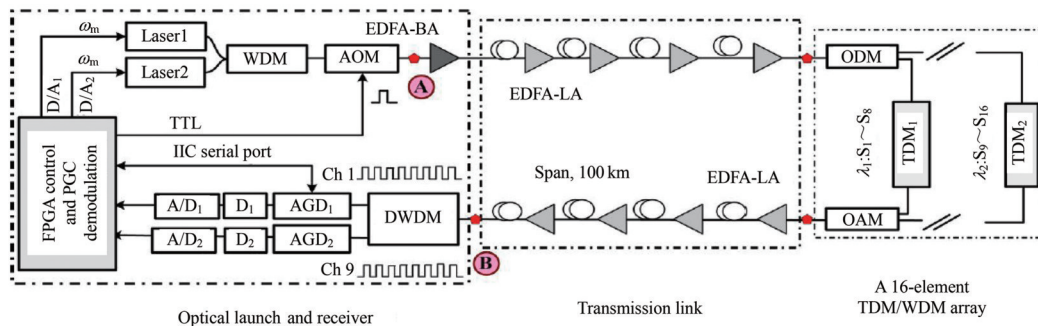


图 6 远程 FOH 阵列系统的原理<sup>[81]</sup>

Fig. 6 Principle of the remote FOH array system<sup>[81]</sup>

随着远程光 FOH 系统传输距离的增加,各种光纤非线性效应对系统的影响加剧,导致了严重的功率损耗与相位噪声,使 FOH 阵列的性能急剧下降<sup>[82]</sup>。因此,各类非线性效应的抑制成为远程 FOH 系统的重要研究课题。光纤中发生非线性效应阈值最低的是受激布里渊散射(SBS),SBS 也是系统输入功率的首要限制因素<sup>[83]</sup>。因此,人们提出了多种 SBS 抑制方法<sup>[84-90]</sup>。在干涉型 FOH 系统中,相位调制技术具有操作简单、抑制效率高的优点,得到了人们的广泛关注<sup>[91]</sup>。Chen 等<sup>[88]</sup>研究了相位调制对干涉型光纤传感系统相位噪声的影响,观察到相位噪声带来的附加相位噪声问题。Hu 等<sup>[92]</sup>提出了一种基于光调制解调的 SBS 抑制方案,消除了该附加相位噪声的影响。Hu 等<sup>[93]</sup>对该附加相位噪声的产生原因进行了详细分析,并提出了一种基于光程差匹配的相位调制方法,有效抑制了干涉型光纤传感系统中的 SBS 噪声。图 7 为用该方法抑制时系统相位噪声随调制频率的变化曲线,图 8 为不同相位调制度 C 下相位噪声随输入功率的变化曲线。当 SBS 得到有效

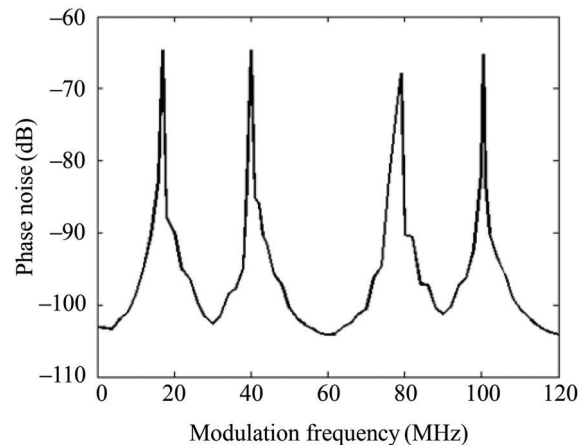


图 7 相位噪声随调制频率的变化<sup>[93]</sup>

Fig. 7 Phase noise changes with modulation frequency<sup>[93]</sup>

抑制后,光纤中的调制不稳定性(MI)成为 FOH 系统中主要的非线性效应,在采用光脉冲传输的远程大规模 FOH 系统中尤为显著,使 MI 成为系统最大传输功率的主要限制因素。光纤中的 MI 从放大的自发辐射(ASE)噪声产生,在原光频两侧产生对称的

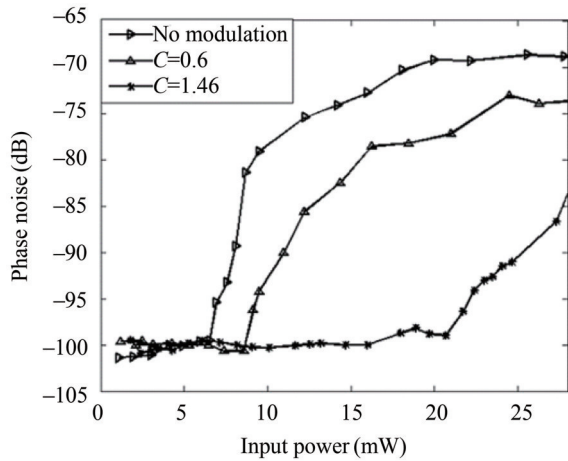


图 8 不同相位调制度下的相位噪声<sup>[93]</sup>  
Fig. 8 Phase noises under different phase modulation indices<sup>[93]</sup>

频谱旁瓣<sup>[94]</sup>。窄带滤波法通过降低 ASE 噪声抑制 MI, 是一种最直接的抑制方法<sup>[95]</sup>; 正交脉冲法可以将 MI 的阈值提高 3 dB<sup>[96]</sup>。Soto 等<sup>[97]</sup>提出了一种基于时频复用的 MI 抑制技术, 可将 MI 效应的阈值提升  $N$  倍 ( $N$  为边带数), 但该方法的复杂度较高, 很难在大规模系统中得到应用。Hu 等<sup>[98]</sup>提出了一种相干种子注入方案, 通过激发感应 MI 抑制 ASE 噪声中产生的自发 MI, 如图 9 所示, 其中, 2 条曲线分别为自发 MI 谱和相干种子注入光谱。实验结果表明, 该方案可以有效提升远程干涉型光纤传感系统中的 MI 阈值, 当输入功率为 800 mW 时, 系统的相位噪声为  $-90$  dB (re rad/Hz<sup>1/2</sup>), 比未采用相干种子注入时至少提高了 20 dB, 如图 10 所示。

#### 2.4 光纤细线拖曳阵

拖曳线列阵是 FOH 最早的应用形式之一, 具

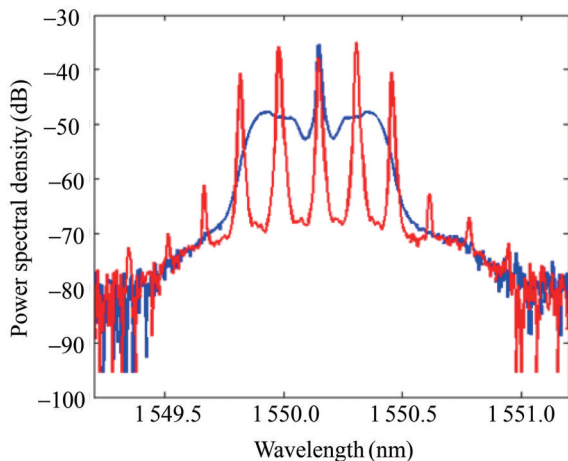


图 9 输入功率为 400 mW 时的输出光谱<sup>[98]</sup>  
Fig. 9 Output spectrum when the input power is 400 mW<sup>[98]</sup>

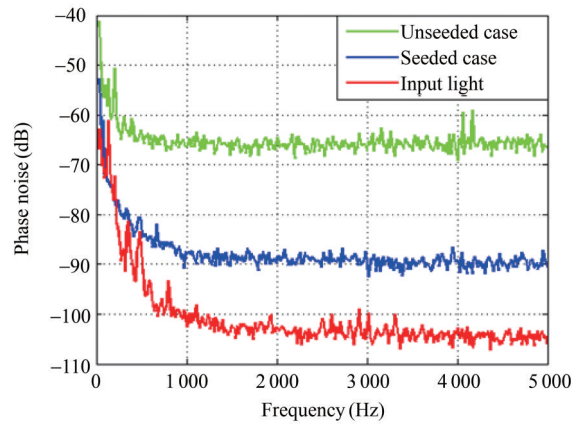
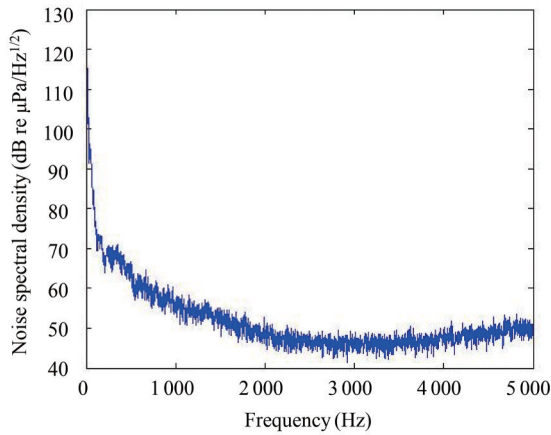


图 10 不同输出光对应的相位噪声<sup>[98]</sup>  
Fig. 10 Phase noises corresponding to different output lights<sup>[98]</sup>

有成本低、质量轻、湿端无源等优点。20 世纪 70 年代, NRL 最早研制出拖曳线列阵形式的 FOH, 并开展了多次海上实验。2007 年, NRL 首次报道了其参与研制的光纤细线拖曳阵 TB-33<sup>[12]</sup>。考虑到拖曳噪声抑制及小型水下平台如无人潜航器 (UUV) 等应用场景, 拖曳线列阵逐渐朝直径更细的方向发展。Souto<sup>[99]</sup>报道了直径为 25 mm 的线列阵; Rajesh<sup>[100]</sup>报道了外径为 32 mm 的线列阵; Plotnikov 等<sup>[71]</sup>报道了基于干涉仪结构的拖曳线列阵, 其外径仅为 20 mm; Zhang 等<sup>[101]</sup>报道了一个 16 基元 DFB 光纤激光器拖曳线列阵, 阵列外径仅为 12 mm, 阵列流噪声为 69 dB (re mPa/Hz<sup>1/2</sup>@1 kHz); Zhang 等<sup>[75]</sup>报道了一种封装直径仅为 7.2 mm 的光纤激光水听器基元; Peng 等<sup>[102]</sup>进行了 32 基元 FOH 拖曳线列阵测试, 在 6 节航速下获得了 75 dB (re  $\mu$ Pa/Hz<sup>1/2</sup>@100 Hz) 的流噪声, 结果如图 11 和图 12 所示。



图 11 拖曳线列阵 FOH 的实物图<sup>[102]</sup>  
Fig. 11 Physical picture of the towed line array FOH<sup>[102]</sup>

图 12 拖曳线阵列 FOH 的流噪声<sup>[102]</sup>Fig. 12 Flow noise of the towed line array FOH<sup>[102]</sup>

### 3 光纤水听器的关键技术

FOH 的本底噪声决定了其检测灵敏度,为了进一步提高 FOH 的探测性能,必须抑制其本底噪声。而 FOH 的本底噪声与其使用的光源和信号处理技术密切相关,因此,低噪声超窄线宽激光器、信号检测和水声信号处理也受到了人们的广泛关注。

#### 3.1 低噪声超窄线宽激光器

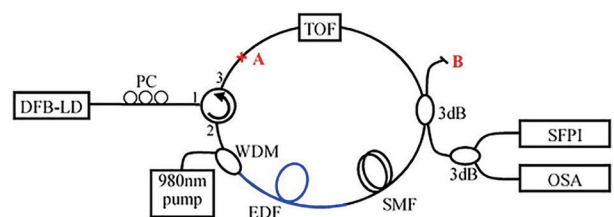
干涉型 FOH 的等效噪声声压决定了其对水下目标的探测性能,因此本底噪声是 FOH 系统的一项关键指标。已有研究表明,光源噪声是干涉型 FOH 系统的主要光电噪声源,因此,低噪声超窄线宽激光器成为干涉型 FOH 的最佳选择。超窄线宽激光器在多个领域中都具有重要应用,如干涉型 FOH、相干光通信、高精度光谱学、光原子时钟<sup>[48,103-104]</sup>。激光线宽很大程度上影响着系统的性能,而不同应用场合对激光器的线宽有不同的要求,常用的干涉型光纤传感要求光源线宽在 kHz 量级。在基于 PGC 技术的干涉型光纤传感系统中,还要求超窄线宽光源具有中心频率稳定和快速调谐稳定的性能。

目前广泛应用的超窄线宽激光器主要有固体激光器、半导体激光器(LD)和掺铒光纤激光器(EDFL)。固体激光器受限于增益介质,输出波长通常为 1.0 μm 或 1.3 μm,难以满足 C 波段(1530~1565 nm)光通信/传感系统的应用需求。LD 用半导体材料可实现多种波长输出,且易于驱动与调制,如外腔式 LD 可实现约 3 kHz 的超窄线宽<sup>[105]</sup>。但 LD 采用电流调制实现激光的快速调谐,稳定性

较差,其相对强度噪声的恶化会导致相位噪声的恶化,从而影响系统的性能。EDFL 的线宽通常在 kHz 量级,具有激光转换效率大、功率高、与光纤系统兼容性强等特点。由于掺铒光纤的增益谱较宽(约为 40 nm),通常需要结合各种线宽压缩技术实现单频输出<sup>[106-108]</sup>。若要实现 Hz 量级线宽的激光,则需要更复杂精密的技术与条件<sup>[109-110]</sup>。

SBS 作为光纤中重要的非线性效应,可用于产生超窄线宽激光<sup>[83]</sup>。Hill 等<sup>[111]</sup>研制了利用光纤中布里渊增益的光纤布里渊激光器(BFL),无需复杂的电路反馈控制技术,且具有 Hz 量级的超窄线宽。Cowle 等<sup>[112]</sup>结合布里渊增益与掺铒光纤增益研制了混合增益型 BEFL,该 BEFL 采用 100 m 单模光纤作为布里渊增益介质,在腔内引入一个 EDFA,以补偿腔损并放大 Stokes 信号。BEFL 不需要满足泵浦耦合谐振腔条件,且具有较低的泵浦阈值和较高的输出功率,但其腔长过长,导致布里渊增益谱内存在几十个模式相互竞争,外界环境的微弱扰动会使激光器产生跳模,需采取一定的措施进行抑制,以实现稳定的单频 BEFL 输出。如陈伟等<sup>[113]</sup>报道的一种多级环形腔结构单纵模 BEFL。最直接有效抑制激光器跳模的方法是缩短激光器腔长,保证增益谱内仅存在一个模式。布里渊增益谱宽的典型值为 20 MHz,增益谱内仅存在一个模式的条件是腔长小于 10 m。可通过高非线性的特殊光纤压缩 BEFL 的腔长<sup>[114]</sup>,但这些光纤本身的损耗以及与普通单模光纤之间的熔接损耗较大,导致激光器的腔损和泵浦阈值较高,且输出功率较低(mW 量级),最终得到的光 SNR 非常有限(约为 10 dB),难以满足高精度应用领域的要求。

Zhou 等<sup>[115]</sup>报道了一种基于泵浦预放大技术的超短腔 BEFL,其结构如图 13 所示。其中,A、B 点分别表示熔接点和功率监测点,DFB-LD 为分布反馈式半导体激光器,PC 为偏振控制器,TOF 为可调谐光滤波器,EDF 为掺铒光纤,SMF 为单模光纤,SFPI 为可调谐光滤波器,OSA 为光谱分析仪。

图 13 基于泵浦预放大的超短腔 BEFL<sup>[115]</sup>Fig. 13 Ultra short cavity BEFL based on pump pre-amplification<sup>[115]</sup>

为扫描法布里-珀罗干涉仪, OSA 为光谱分析仪。与传统 BEFL 的结构不同, 该 BEFL 腔内的 EDFA 位于单模光纤之前。进入腔内的布里渊泵浦光先经 EDFA 放大, 放大后的布里渊泵浦光再进入单模光纤激发 SBS。因此在较低的外部布里渊泵浦光条件下, 实际注入到单模光纤上的功率较高, 弥补了短单模光纤造成的增益不足, 可产生较大的布里渊增益。此外, 激光器腔内引入了一个窄带 TOF, 用于抑制 ASE 噪声并保证激光器工作在布里渊 Stokes 波长处。用 5 m 的单模光纤作为布里渊增益介质, 激光器的总腔长小于 10 m, 满足稳定单频运转的腔长条件。实验结果表明, 该激光器具有单纵模、低阈值(约为 20 mW)和高功率(大于 10 mW)特性。

周会娟等<sup>[116]</sup>提出了一种用普通掺铒光纤同时提供布里渊增益与线性增益的紧凑型 BEFL, 其结构如图 14 所示。其中, BP 为布里渊泵浦光。用 4 m 的掺铒光纤作为增益介质, 用 980 nm 激光作为泵浦光, 其泵浦阈值较低(小于 20 mW); BEFL 的输出为稳定的单频激光, 输出功率可以超过 10 mW。Chen 等<sup>[117]</sup>设计了一台全保偏结构低噪声紧凑型 BEFL, 其偏振消光比可达到 31 dB, 相位噪声低至  $-125$  dB(re rad/Hz<sup>1/2</sup>@1 kHz, 1 m 光程差), 线宽小于 1 kHz<sup>[118]</sup>。利用 Voigt 线型拟合方法得到的洛伦兹线宽仅为 50 Hz<sup>[119]</sup>, 利用拍频法得到线宽在 Hz 量级<sup>[120]</sup>。利用压电陶瓷环的伸缩效应, 可实现 BEFL 激光频率的快速调谐, 最大频率调谐范围约为 60 MHz, 最大频率调谐速率可达到 48 kHz, 快速调谐 BEFL 在 1 kHz 频率处的相位噪声为  $-124$  dB/Hz<sup>1/2</sup>(re rad 归一化至 1 m 光程差), 如图 15 所示<sup>[121]</sup>; 且基于稳定压电陶瓷调制的 BEFL 比电流调制的 LD 快速调谐稳定性更好。

### 3.2 信号检测和水声信号处理

需解调出干涉型 FOH 中的相位信号才能获得

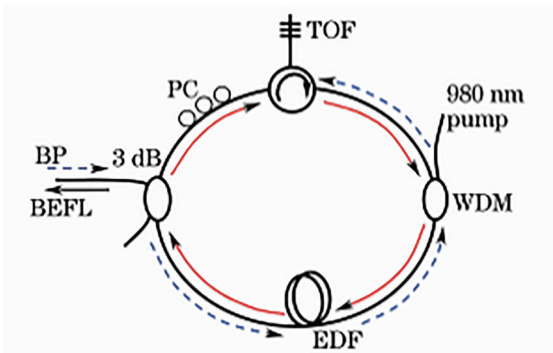


图 14 紧凑型 BEFL 的原理<sup>[116]</sup>

Fig. 14 Principle of the compact BEFL<sup>[116]</sup>

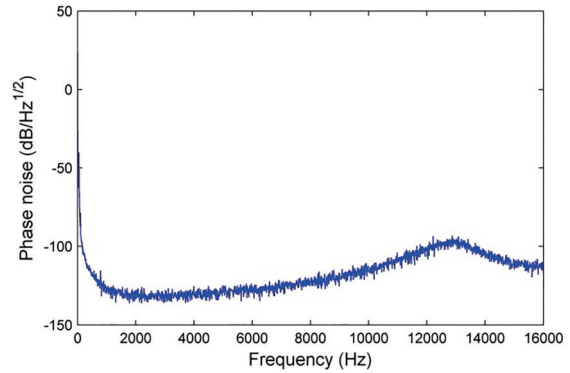


图 15 BEFL 的相位噪声谱<sup>[121]</sup>

Fig. 15 Phase noise spectrum of the BEFL<sup>[121]</sup>

水声信号, 因此信号检测是干涉型 FOH 的一项关键技术。目前信号检测方法包括有源零差法、主动相位补偿法、 $3 \times 3$  多相检测法、PGC 和外差法等。其中, 有源零差法通过检测干涉仪的输出光强反推出两臂相位差的变化, 并反馈控制参考臂上的相位调制器, 使干涉仪得到恒定输出, 然后根据施加在调制器上的信号提取声信号。主动相位补偿法对信号进行分段处理, 在受环境信号影响的低频段, 采用有源相位补偿, 根据干涉仪的输出推算外界低频干扰产生的相位差变化, 并反馈控制参考臂上的相位调制器, 使干涉仪工作在灵敏区。这两种方式均采用相位调制器进行有源补偿, 湿端传感头包含有源器件, 不利于大规模阵列应用。

$3 \times 3$  多相检测方法最早由 NRL 在 20 世纪 80 年代提出, 具有动态范围大、检测系统简单的优点, 但信号检测对  $3 \times 3$  耦合器的参数依赖性较大。Liu 等<sup>[122]</sup>提出了一种比较准确的椭圆拟合  $3 \times 3$  耦合器参数标定方法, 为  $3 \times 3$  多相检测技术的实际应用奠定了基础。近年来,  $3 \times 3$  耦合器制作工艺的提升, 使  $3 \times 3$  多相检测技术在干涉型光纤传感<sup>[123-125]</sup>和相位敏感光时域反射计 ( $\Phi$ -OTDR)<sup>[126-128]</sup>领域均得到了广泛应用。

PGC 法是大规模 FOH 系统的重要信号检测方案之一, 具有光学结构简单及对器件性能依赖性小的优点。为了消除各种不利因素对信号检测的影响, 人们提出了多种改进的 PGC 法, 包括 PGC-反正切-微分自相乘法 (PGC-Atan-DSM)<sup>[129]</sup>、PGC-微分自相乘法 (PGC-DSMI)<sup>[130]</sup>、消除交流幅度影响的 PGC (PGC-Elim-B)<sup>[131]</sup>、消除交流幅度和调制度影响的 PGC (PGC-Elim-BC)<sup>[132]</sup> 方法等。Volkov 等<sup>[133]</sup>利用比例-积分 (PI) 控制实现了 PGC 信号检测中相位调制深度的稳定控制, 控制精度达到 0.025 rad。Nikitenko 等<sup>[134]</sup>提出了一种载波相位延迟无关的

PGC 信号检测方法,获得了一定范围内载波相位延迟的低谐波失真信号检测。Huang 等<sup>[135]</sup>使用反馈控制实现了 PGC 信号检测中相位调制深度和载波相位延迟的同时锁定,并实现了低噪声信号检测。Yao 等<sup>[136]</sup>提出了一种结合  $3 \times 3$  多相检测的改进 PGC 检测方法,实现了强度噪声引起的相位噪声抑制。

外差法具有动态范围大、干涉信号形式简单的优点,可适用于大规模阵列。但该方法需要对光脉冲进行移频,对移频器的稳定性要求较高。近年来,AOM 等器件移频稳定性的提高,使外差检测方法得到了广泛应用<sup>[137-141]</sup>。

利用上述信号检测方法,可以获得各水听器传感的水声信号,对水声信号进行处理才能得到目标的方位信息。FOVH 能同时采集和处理声场中的声压和质点振速信息,不仅可以丰富信号处理方法的内容,也可以获得优于传统声压水听器的目标探测性能。Nehorai 等<sup>[142-144]</sup>在平面波模型中推导了多传感器多目标方位估计的克拉默-拉奥下界(CRB),采用小尺度矢量阵就能达到大尺度声压阵的测向性能。随着矢量阵列方位估计性能研究的不断深入,人们逐渐将目标转向到利用矢量阵列实现高分辨率的方位估计,提出了以平面波模型为基础、空间白噪声背景下矢量水听器阵列的基于旋转不变技术信号参数估计(ESPRIT)算法和矩阵特征空间分解(MUSIC)算法,这些高分辨率的方位估计算法突破了常规算法的瑞利限,显著提高了矢量阵的定向性能<sup>[145-147]</sup>。国内学者也对矢量水听器信号处理技术开展了深入研究,并取得了一系列成果。袁志勇等<sup>[148]</sup>提出了一种四阶累积量 MUSIC 算法,得到了比传统 MUSIC 算法更好的定向性能,并通过湖

上实验对算法的性能进行了验证。Liang 等<sup>[149]</sup>对基于单矢量水听器改进的 MVDR 高分辨率的方位估计算法进行了研究。国防科技大学开展了多次 FOVH 湖上及海上实验,充分验证了 FOVH 优异的目标探测性能。图 16 为在南海开展的单基元 FOVH 目标定向海上测试结果,探测目标的最远距离达到 10 km。其中,白色亮线表示水声信号处理得到的目标方位,实线表示 GPS 记录的方位,定向误差小于  $10^\circ$ 。

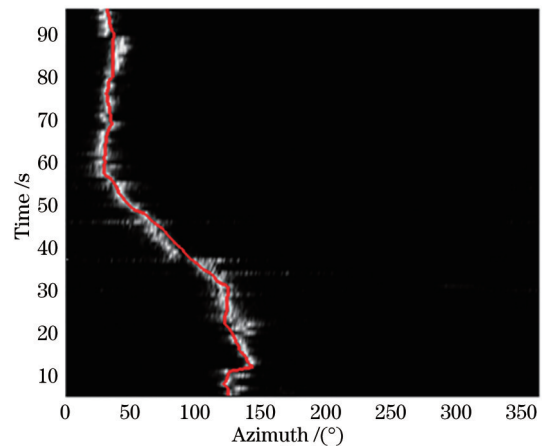


图 16 单基元 FOVH 的目标定向结果

Fig. 16 Target orientation results of the single primitive FOVH

传统声压水听器阵列在定向过程中会出现左右舷模糊的问题,即分不清目标位于探测阵列的左侧还是右侧。将 FOVH 组成水平阵列可解决该问题,在相同基元数及孔径条件下,还能获得更精确的定向结果。图 17 为本课题组某次海上实验中 4 基元 FOVH 水平阵列对航船目标的定向结果。

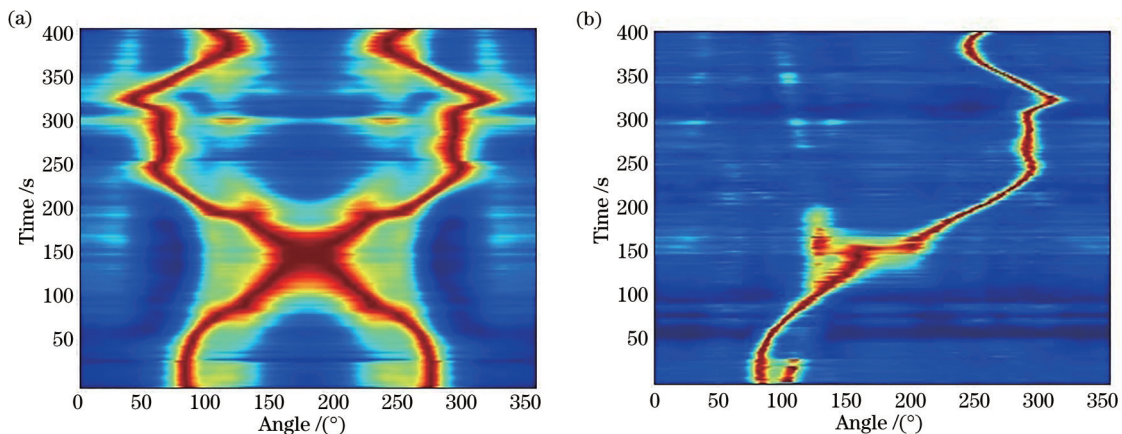


图 17 4 基元 FOVH 水平阵列的目标定向结果。(a)声压子阵的定向结果;(b)矢量阵列的定向结果

Fig. 17 Target orientation result of 4-primitive FOVH horizontal array. (a) Orientation result of the sound pressure sub-array; (b) orientation result of the vector array



垂直阵列阵型本身对目标方位的变化不敏感,因此声压水听器组成的垂直阵列无法估计目标方位。由于单个 FOVH 能对目标定向,因此将数据融合方法应用于 FOVH 垂直阵列可以得到高分辨率的

目标定向结果。Liang 等<sup>[150]</sup>在某次海上实验中用 16 基元 FOVH 垂直阵列对航船目标进行定向实验,并将其与单矢量基元的定向结果进行对比,结果如图 18 所示,其中,直线为 GPS 记录的方位角。

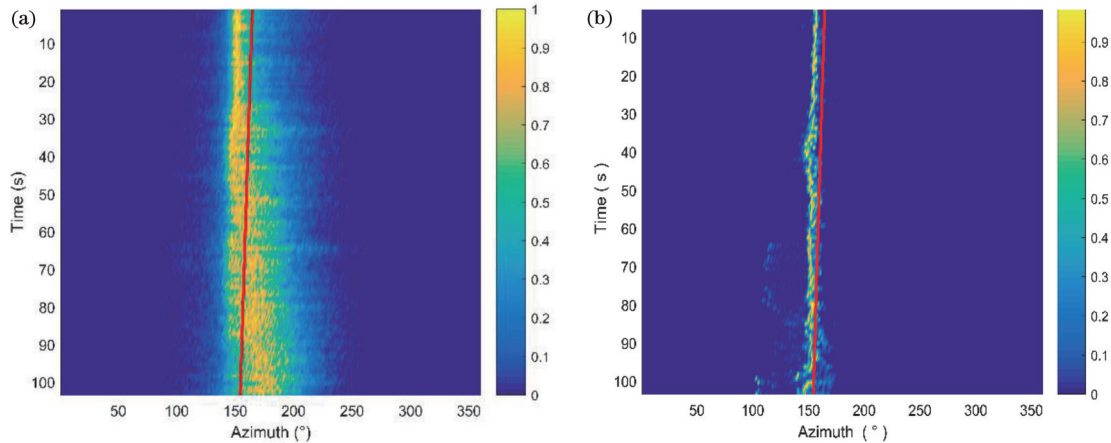


图 18 FOVH 垂直阵列的目标定向结果。(a) 单个基元; (b) 矢量垂直阵列<sup>[150]</sup>

Fig. 18 Target orientation result of the FOVH vertical array. (a) Single primitive; (b) vector vertical array<sup>[150]</sup>

## 4 新型光纤水听器

FOVH 可同时获得声场的标量与三维矢量信息,而分布式 FOH 则具备空间连续拾取水下声信号的能力,相比传统 FOH,二者在相同条件下的水声目标探测能力都有所提升,成为新型 FOH 的典型代表。

### 4.1 光纤矢量水听器

FOVH 是一种新型 FOH,通常由一个光纤声压水听器与相互正交的三个矢量传感器组成,可同步共点地获得声场的标量与三维矢量信息。相比传统光纤声压水听器,FOVH 首先通过声压信号与矢量信号的结合,使单个 FOVH 获得心形空间指向性,并获得 4.8~6 dB 的空间增益,从而抑制各向同性环境噪声并消除左右舷模糊,有效提升了系统的探测距离;其次,FOVH 的指向性与频率无关,有利于实现低频探测;最后,FOVH 的声压与振速信号的联合处理为声信号提供了新维度,可进一步提升系统的水声探测性能,且 FOVH 所需的阵列规模较小。

自 Tveten 等<sup>[151]</sup>提出基于加速度计的 FOVH 以来,FOVH 得到了快速发展<sup>[152-157]</sup>。Kersey 等<sup>[152]</sup>提出基于顺变柱体结构的 FOVH 已经发展成熟并得到了广泛应用<sup>[47,157-163]</sup>。此外,Chen 等<sup>[163]</sup>报道了一种三维地震检波器,该地震检波器由三个正交方向缠绕于顺变柱体上的迈克耳孙干涉仪组成,探测带宽为 2~150 Hz,加速度灵敏度可达到 50 dB(re rad/g),横向抑制比约为 30 dB。Yi 等<sup>[164]</sup>报道了一种应用于

地震波检测的光纤加速度计,用一种吸振环提高谐振系统的阻尼系数,将谐振峰处的灵敏度降低了 21.79 dB,从而提升了系统的工作带宽,并有效改善了系统的瞬态响应检测精度,该团队于 2020 年成功将该光纤加速度计组阵应用于井下微地震监测<sup>[141]</sup>。娄威龙等<sup>[165]</sup>公开了一种基于自垂直结构的光纤加速度浅海检波器,可应用于海底地震波检测,其自身的敏感方向始终垂直于海底方向,从而提高了接收信号的灵敏度,对于 FOVH 的结构设计具有一定的参考意义。2003 年,国防科技大学研制了三分量干涉型 FOVH,该水听器采用顺变柱体结构,加速度的灵敏度可达到 56.4 dB(re rad/g),工作频带上限为 500 Hz,并进行了我国首次 FOVH 海上实验。近年来,国防科技大学研制出了一种加速度灵敏度达到 48 dB(re rad/g)的新型 FOVH,并在深海环境中开展了 16 基元 FOVH 垂直阵列的性能测试实验,验证了该 FOVH 的工作性能。同时,国防科技大学还研究了一种可应用于 6 km 海深的 FOVH(最高耐压为 66 MPa),其探头结构如图 19 所示。图 20 为该 FOVH 的加速度灵敏度,在 10~1000 Hz 范围内加速度的灵敏度约为 49 dB(re rad/g),且灵敏度波动小于 0.7 dB。图 21 为该 FOVH 的三轴指向性图,其正交串扰小于 -52.9 dB。为了进一步探索 FOVH 在军事应用的可能性,美国与澳大利亚的研究机构将注意力集中于结构更紧凑、尺寸更小、质量更轻的弹簧盘与悬臂梁结构 FOVH<sup>[154,156,166]</sup>。

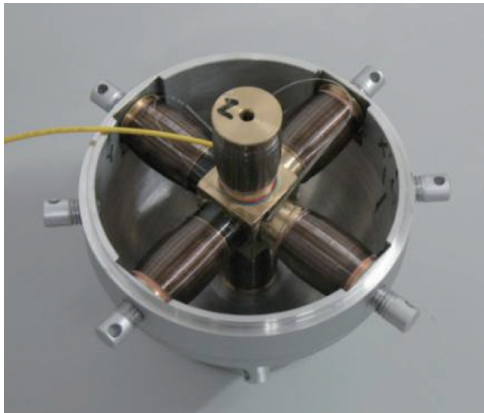


图 19 FOVH 的结构

Fig. 19 Structure of the FOVH

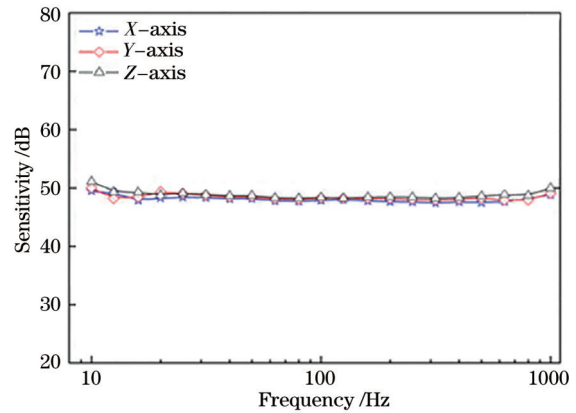


图 20 FOVH 的加速度灵敏度

Fig. 20 Acceleration sensitivity of the FOVH

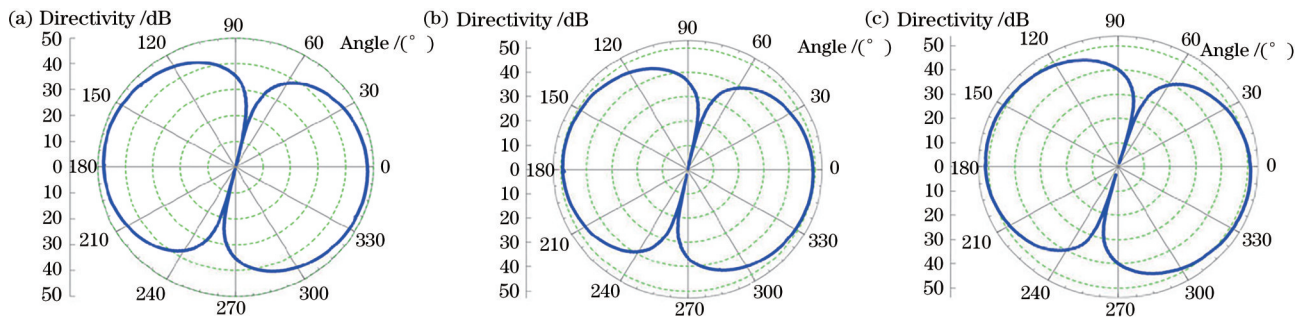


图 21 FOVH 的三轴指向性。(a) x 轴; (b) y 轴; (c) z 轴

Fig. 21 Three-axis directivity of the FOVH. (a) x-axis; (b) y-axis; (c) z-axis

根据传感器的类型可将 FOVH 分为干涉仪型、FBG 型、光纤激光器型 FOVH, 其中, 最早与最成熟的方案是基于光纤干涉仪的 FOVH, 也被称为干涉型加速度计<sup>[47, 154, 157, 161]</sup>。2000 年以后, 人们开始探索基于 FBG 及 DFB 光纤激光器的 FOVH 方案<sup>[158-160]</sup>及其小型化设计问题。近年来对 FOVH 的研究主要集中在小尺寸、低噪声、基于 DFB 光纤激光器的 FOVH<sup>[156, 159]</sup>方面, Foster 等<sup>[167]</sup>建立了一个完整的理论模型, 使用于 FOVH 的 DFB 光纤激光器理论走向成熟; Jin 等<sup>[168]</sup>报道了一种基于 FBG 的加速度计, 在 20~200 Hz 频率范围获得了 42 dB (re rad/g) 的加速度灵敏度; Zhang 等<sup>[169]</sup>研究了基于 DFB 光纤激光器的 FOVH, 在 5~300 Hz 频率范围获得了 33 dB (re pm/g) 的平坦加速度响应。Liu 等<sup>[170]</sup>报道了一种基于弱反射光栅的三轴光纤加速度计, 通过双脉冲外差解调实现了共模噪声的抑制, 相比传统基于参考干涉仪抑制共模噪声的方法, 该方法对共模噪声的抑制能力提升 4.5 dB, 且不需要额外的参考干涉仪, 极大降低了系统的体积和成本。

目前研究最广泛的是基于加速度传感的

FOVH, 但该类 FOVH 的声压灵敏度会随频率的下降而降低。为了解决该问题, NRL 研究了基于振速传感的 FOVH, 并将其成功应用于水声振速传感中。该 FOVH 将 DFB 光纤激光器固定在一个悬臂梁结构上, 以测量声场导致的质点振速信号; 且该结构的 FOVH 灵敏度响应与频率无关, 在整个工作频段内具有平坦的灵敏度响应<sup>[171-173]</sup>。

#### 4.2 分布式光纤水听器

分布式 FOH 是一种利用分布式光纤声波传感 (DAS) 技术探测水下声信号的 FOH 阵列。传统 FOH 由一个光纤干涉仪组成, 包含光纤耦合器和法拉第旋转镜等多个光纤器件。多个 FOH 组成 FOH 阵列, 对水下声信号进行空间分立拾取。与传统 FOH 阵列不同, 分布式 FOH 仅由一根光纤组成。简单的组成结构使分布式 FOH 具备高可靠性和空间连续拾取水下声信号的能力。因此, 分布式 FOH 成为 FOH 的重要分支和新的发展方向; 同时, 分布式 FOH 正朝着相位噪声更低和声压灵敏度更高的方向发展, 声信号提取技术、声压灵敏度增强技术和相位噪声抑制技术也成为分布式 FOH 的关键技术。

DAS 技术以  $\Phi$ -OTDR 为基础, 通过相干探测或

直接探测方法收集传感光纤各个位置的后向瑞利散射信号,采用相位解调技术,获取长度相隔 $L$ 的两处传感光纤产生的瑞利信号相位差,利用相位差与声信号的线性关系从相位差中获得声信号信息。Masoudi等<sup>[174]</sup>采用 $3\times 3$ 相位解调技术实现了分布式声波探测。Fang等<sup>[175]</sup>采用PGC相位解调技术实现了分布式声波探测。He等<sup>[176]</sup>将数字外差相位解调技术应用于DAS,实现了分布式声波探测。He等<sup>[177]</sup>报道了一种应用双脉冲外差技术实现声探测的DAS系统,有效改善了DAS的性能。为了提高瑞利信号的探测SNR,Lu等<sup>[178]</sup>采用相干探测技术,利用本地连续光与瑞利信号光干涉,实现了对瑞利信号的高SNR探测。为了获取声信号,数字外差相位解调技术被应用于DAS,实现了分布式声波探测<sup>[179]</sup>。

等效噪声声压是衡量FOH噪声水平的重要指标,可描述FOH系统的最小可测声压信号。为了降低分布式FOH的等效噪声声压,需提升水听器的声压灵敏度。光纤的声压灵敏度约为 $-200\text{ dB/m}(\text{re rad}/\mu\text{Pa})$ ,无法满足微弱水声信号探测对等效噪声声压的要求。因此,需将传感光纤缠绕至增敏结构,以提升光纤的声压灵敏度。目前的增敏方式包括分立式增敏和连续式增敏。分立式增敏采用传统FOH增敏方式,将传感光纤依次缠绕在多个增敏结构上。该增敏方式构成的分布式FOH由多个分立声压灵敏度增强的传感基元串联构成,在应用形式上,与传统FOH阵列相同,仅能空间分立采集水声信号。因此,这种分立式增敏方式的分布式FOH在光学上空间连续,在声学上空间分立。国防科技大学研制的第一代分布式FOH系统,采用分立式增敏结构,其实物如图22所示。为了实现对传感光纤的空间连续增敏,可将传感光纤连续缠绕至

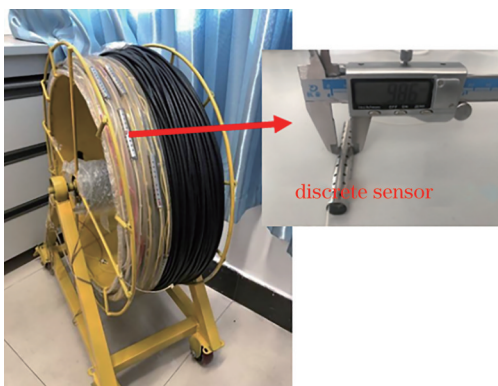


图 22 基于分立增敏结构的分布式 FOH

Fig. 22 Distributed FOH based on discrete sensitivity-enhanced structure

一定长度的增敏结构上,构成空间连续增敏的分布式FOH,实现对水声信号的高灵敏度和空间连续采集。国防科技大学研制的第二代分布式FOH系统采用连续式增敏结构,实物如图23所示。Lu等<sup>[180]</sup>报道了自研的连续增敏分布式FOH。Lavrov等<sup>[63]</sup>报道的全新光纤增敏方法通过在光纤上涂覆相关材料增强传感光纤的声压灵敏度,但该方法对光纤不同频率的声压信号灵敏度增强效果不一致。

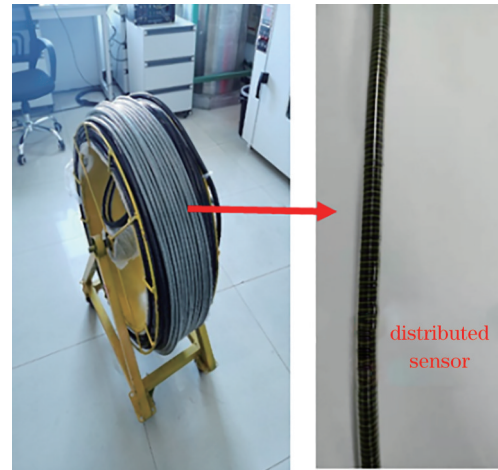


图 23 基于连续增敏结构的分布式 FOH

Fig. 23 Distributed FOH based on consecutive sensitivity-enhanced structure

分布式FOH的相位噪声主要由瑞利信号的SNR决定,瑞利信号由探测脉冲覆盖光纤长度内的大量瑞利散射光组成,瑞利信号的强度为大量散射光的干涉强度。由于产生瑞利散射光的散射点沿光纤随机分布,瑞利信号的强度沿光纤出现的衰落即相干衰落,由衰落决定的相位噪声为衰落噪声。衰落噪声位置的随机性严重影响了分布式FOH对声信号的空间连续拾取性能,且衰落噪声易受外界扰动影响,某个传感基元的衰落噪声会因外界扰动发生随机变化,这会严重影响分布式FOH的探测稳定性。

为了消除衰落噪声对声信号探测的影响,人们提出了多种抑制衰落噪声的方法。这些方法的核心是利用衰落噪声与光模式的相关性,即利用不同光模式的瑞利信号抑制衰落噪声,包括频率、波长、相位等纵模<sup>[181-185]</sup>以及偏振态等横模。如何综合利用不同模式的瑞利信号,是决定衰落噪声抑制效果的关键。Zabihi等<sup>[181-182]</sup>提出了强度选择方案,即对比不同频率瑞利信号的强度大小,选择强度最大的瑞利信号进行相位提取。Chen等<sup>[183]</sup>提出了旋转矢

量求和(RVS)方法,并将其应用于基于光频域反射仪(OFDR)技术的 DAS 系统进行衰落噪声抑制。该方法对各个模式的瑞利光信号强度进行矢量求和,获得了融合强度,并对融合强度进行相位提取,从而获得无衰落噪声的声信号。Wu 等<sup>[184]</sup>将 RVS 方法应用于基于  $\Phi$ -OTDR 的 DAS 系统中,抑制了衰落噪声。2019 年,中科院半导体所在 OFS-China 2019 学术会议上介绍了一种多通道相关权重相加方法,该方法假设相邻传感基元处的声信号相同,将相邻传感基元获得的声信号权重相加,获得了无衰落噪声干扰的声信号,权重大小由该基元与其他基元获得的声信号相关系数决定。Lu 等<sup>[185]</sup>基于直

接探测技术的 DAS 提出了一种基于频分复用的衰落噪声抑制方案。该方案利用等臂干涉原理,在探测器端探测得到的瑞利干涉信号强度是不同模式瑞利干涉信号强度的叠加,无须进行附加运算即可消除衰落噪声。该方案的系统结构和实验结果如图 24、图 25 所示。其中,L 为光源,RF 为射频信号,AFG 为任意信号发生器,EOIM 为电光强度调制器,PZT 为压电陶瓷,OBPF 为光学带通滤波器,OC 为光纤耦合器,CIR 为光纤环形器,PD 为光探测器,DAQ 为数据采集, $f_m$  为 EOIM 调制频率, $f_{PGC}$  为 PGC 的调制频率, $I(z, t)$ 、 $F_n(z)$  分别为干涉信号的强度和相位,其中, $z$  表示距离, $t$  为时间。

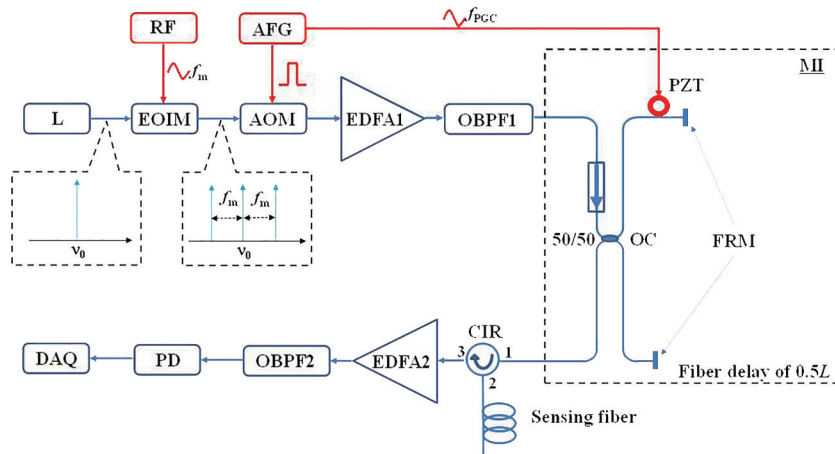


图 24 基于频分复用的衰落噪声抑制技术系统结构<sup>[185]</sup>

Fig. 24 Structure of fading noise suppression based on frequency division multiplexing<sup>[185]</sup>

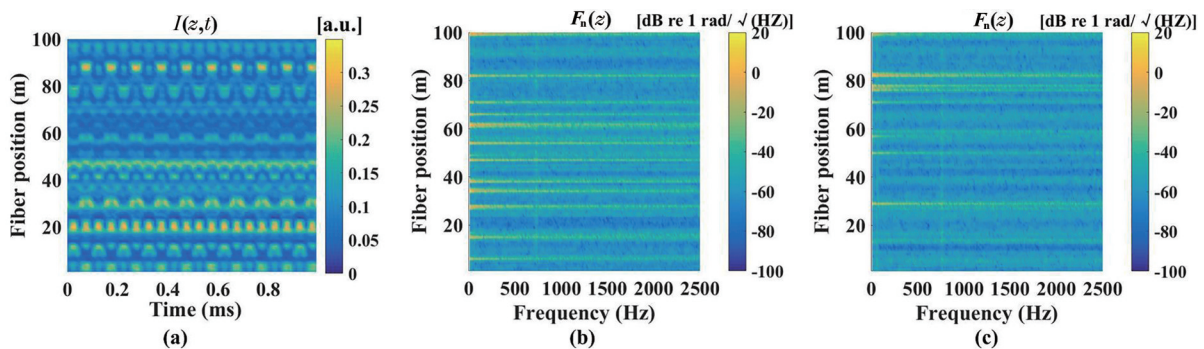


图 25 基于频分复用的衰落噪声抑制效果。(a)干涉信号强度位置-时域图;(b)相位位置-频谱图;(c)抑制后的相位位置-频谱图<sup>[185]</sup>

Fig. 25 Fading noise suppression effect based on frequency division multiplexing. (a) Interference signal strength position-time domain diagram; (b) phase position-spectrogram; (c) suppressed phase position-spectrogram<sup>[185]</sup>

针对基于相干探测技术的 DAS,本课题组提出了一种基于分集接收和最优权重平均算法的衰落噪声抑制技术。该方案将不同光模式瑞利信号的相位权重相加,以消除衰落噪声,权重大小由各光模式瑞利信号的相位噪声大小决定,该方案的系统结构和实验

结果如图 26 所示。其中,OPM 为光相位调制器,BPF 为带通滤波器,FUT 为测试光纤,BPD 为平衡光探测器,PSD 为功率谱密度。实验结果表明,采用该方法时光纤沿线各传感基元在 1 kHz 处的相位噪声功率谱密度均小于  $-60 \text{ dB}(\text{re rad}/\text{Hz}^{1/2})$  且无衰落噪声出现。



- aerodefensetech.com/component/content/article/adt/tech-briefs/physical-sciences/13914.
- [14] Hodgson C W, Digonnet M J F, Shaw H J. Large-scale interferometric fiber sensor arrays with multiple optical amplifiers[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(21): 1651-1653.
- [15] Hodgson C W, Wagener J L, Digonnet M J F, et al. Optimization of large-scale fiber sensor arrays incorporating multiple optical amplifiers: part I: signal-to-noise ratio[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(2): 218-223.
- [16] Hodgson C W, Wagener J L, Digonnet M J F, et al. Optimization of large-scale fiber sensor arrays incorporating multiple optical amplifiers: part II: pump power[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(2): 224-231.
- [17] Digonnet M J F, Vakoc B J, Hodgson C W, et al. Acoustic fiber sensor arrays[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5502: 39-50.
- [18] Vakoc B J, Digonnet M J F, Kino G S. Demonstration of a 16-sensor time-division-multiplexed Sagnac-interferometer-based acoustic sensor array with an amplified telemetry and a polarization-based biasing scheme[C]//2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. OFS 2002(Cat. No. 02EX533), May 10, 2002, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2002: 325-328.
- [19] Nash P. Review of interferometric optical fibre hydrophone technology[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 1996, 143(3): 204-209.
- [20] Nash P J, Cranch G A, Cheng L K, et al. 32-element TDM optical hydrophone array[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3483: 238-242.
- [21] Hill D J, Nash P J, Hawker S D, et al. Progress toward an ultrathin optical hydrophone array[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3483: 301-304.
- [22] Nash P J, Cranch G A, Hill D J. Large-scale multiplexed fiber optic arrays for geophysical applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4202: 55-65.
- [23] Cranch G A, Nash P J. Large-scale multiplexing of interferometric fiber-optic sensors using TDM and DWDM[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(5): 687-699.
- [24] Nash P J, Latchem J, Cranch G, et al. Design, development and construction of fibre-optic bottom mounted array[C]//2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. OFS 2002(Cat. No. 02EX533), May 10, 2002, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2002: 333-336.
- [25] Cranch G A, Nash P J, Kirkendall C K. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2003, 3(1): 19-30.
- [26] Hill D J. The evolution and exploitation of the fiber-optic hydrophone[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6619: 661907.
- [27] Nakstad H, Kringelbotn J T. Realisation of a full-scale fibre optic ocean bottom seismic system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7004: 700436.
- [28] Waagaard O H, Rønnekleiv E, Forbord S, et al. Reduction of crosstalk in inline sensor arrays using inverse scattering[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7004: 70044Z.
- [29] Waagaard O H, Rønnekleiv E, Forbord S, et al. Suppression of cable induced noise in an interferometric sensor system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7503: 75034Q.
- [30] Ronnekleiv E, Waagaard O H, Thingbo D, et al. Suppression of Rayleigh scattering noise in a TDM multiplexed interferometric sensor system[C]//OFC/NFOEC 2008-2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, February 24-28, 2008, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008: 1-3.
- [31] Hu Y M, Hu Z L, Luo H, et al. Recent progress toward fiber optic hydrophone research, application and commercialization in China[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8421: 84210Q.
- [32] Hu Y M. All polarization-holding fiber polarizer[D]. Beijing: Tsinghua University, 1999.  
胡永明. 保偏光纤偏振器研究[D]. 北京: 清华大学, 1999.
- [33] Meng Z, Hu Y M, Xiong S D, et al. All polarization maintaining fiber hydrophone array[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(5): 415-417.  
孟洲, 胡永明, 熊水东, 等. 全保偏光纤水听器阵列[J]. *中国激光*, 2002, 29(5): 415-417.
- [34] Meng Z. Research on technology of fiber optic hydrophone array based on phase generated carrier demodulation with laser frequency modulation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.  
孟洲. 基于光频调制 PGC 解调的光纤水听器阵列技

- 术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2003.
- [35] Ni M, Xiong S D, Meng Z, et al. Realization of digital demodulation of the phase generated-carrier technique in fiber optic hydrophone systems[J]. *Applied Acoustics*, 2004, 23(6): 5-11.  
倪明, 熊水东, 孟洲, 等. 数字化相位载波解调方案在光纤水听器系统中的实现[J]. *应用声学*, 2004, 23(6): 5-11.
- [36] Wang Z F, Hu Y M, Meng Z, et al. Novel mechanical antialiasing fiber-optic hydrophone with a fourth-order acoustic low-pass filter[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(11): 1267-1269.
- [37] Hu Y M, Meng Z, Xiong S D, et al. Development of interferometric all polarization maintaining fiber hydrophone array[J]. *Acta Acustica*, 2003, 28(2): 155-158.  
胡永明, 孟洲, 熊水东, 等. 干涉型全保偏光纤水听器阵列研制[J]. *声学学报*, 2003, 28(2): 155-158.
- [38] Ni M, Yang H Y, Xiong S D, et al. Investigation of polarization-induced fading in fiber-optic interferometers with polarizer-based polarization diversity receivers[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(11): 2387-2390.
- [39] Ni M, Hu Y M, Meng Z, et al. Study on fiber optic hydrophone unit[J]. *Applied Acoustics*, 2003, 22(2): 1-7.  
倪明, 胡永明, 孟洲, 等. 光纤水听器探头技术研究[J]. *应用声学*, 2003, 22(2): 1-7.
- [40] Meng Z, Hu Y M, Ni M, et al. Development of a 32-element fiber optic hydrophone system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5589: 114-119.
- [41] Xiong S D. Research on the fiber optic vector hydrophone[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.  
熊水东. 光纤矢量水听器研究[D]. 长沙:国防科技大学,2003.
- [42] Xiong S D, Luo H, Hu Y M, et al. Research on interferometric polarization maintaining fiber optic micro-vibration vector sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(7): 843-847.  
熊水东, 罗洪, 胡永明, 等. 干涉型保偏光纤微振动矢量传感器研究[J]. *中国激光*, 2004, 31(7): 843-847.
- [43] Zhang H Y, Zhang M, Wang L W, et al. Output noise analysis of optical fiber interferometric sensors using a  $3 \times 3$  coupler[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(12): 125203-125211.
- [44] Zhang H Y, Zhang M, Wang L W, et al. An improved PGC demodulation method to suppress the impact of laser intensity modulation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8199: 81990Q.
- [45] Tian C D, Wang L W, Zhang M, et al. Performance improvement of PGC method by using lookup table for optical seismometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7503: 750348.
- [46] Rao W. Study on key techniques of fiber optic vector hydrophone for high resolution seafloor strata detection[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.  
饶伟. 光纤矢量水听器海底地层结构高分辨率探测关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2012.
- [47] Luo H, Xiong S D, Hu Y M, et al. Research on all polarization-maintaining fiber optic accelerometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 6004: 60040R.
- [48] Wang J F, Luo H, Meng Z, et al. Experimental research of an all-polarization-maintaining optical fiber vector hydrophone[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1178-1184.
- [49] Wu Y Q. Study on key techniques of fiber optic vector hydrophone for towed line array applications [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.  
吴艳群. 拖线阵用光纤矢量水听器关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011.
- [50] Niu S L, Hu Y M, Hu Z L, et al. Fiber Fabry-Pérot hydrophone based on push-pull structure and differential detection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(20): 1499-1501.
- [51] Ma L N, Hu Y M, Luo H, et al. DFB fiber laser hydrophone with flat frequency response and enhanced acoustic pressure sensitivity[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(17): 1280-1282.
- [52] Chen W. Influences and suppression techniques of nonlinear effects on long-haul interferometric fiber sensing systems[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.  
陈伟. 远程干涉型光纤传感系统非线性效应影响及其抑制技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2013.
- [53] Cao C Y. Study on key techniques of high performance fiber-optics hydrophone array based on ultra-remotely optical transmission and cascaded amplifiers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.  
曹春燕. 光纤水听器阵列超远程光传输低噪声光放

- 大链关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [54] Cranch G A, Nash P J. High multiplexing gain using TDM and WDM in interferometric sensor arrays[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3860: 531-537.
- [55] Hodgson C W, Vakoc B J. Large scale WDM/TDM sensor array employing erbium-doped fiber amplifiers: US6282334[P]. 2001-08-28.
- [56] Farsund O, Erbeia C, Lachaize C, et al. Design and field test of a 32-element fiber optic hydrophone system[C]//2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. OFS 2002(Cat. No. 02EX533), May 10, 2002, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2002: 329-332.
- [57] Shindo Y, Yoshikawa T, Mikada H. A large scale seismic sensing array on the seafloor with fiber optic accelerometers[C]//SENSORS, 2002 IEEE, June 12-14, 2002, Orlando, FL, USA. New York: IEEE Press, 2002: 1767-1770.
- [58] Hill D, Nash P. Fiber-optic hydrophone array for acoustic surveillance in the littoral[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5780: 1-10.
- [59] Austin E, Zhang Q, Alam S U, et al. 500 km remote interrogation of optical sensor arrays[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7753: 77532M.
- [60] Akkaya O, Dignonnet M J F, Kino G S, et al. Time-division-multiplexed interferometric sensor arrays[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(16): 3001-3008.
- [61] Liao Y, Austin E, Nash P J, et al. High performance architecture design for large scale fibre-optic sensor arrays using distributed EDFAs and hybrid TDM/DWDM[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(9): 094024.
- [62] Liao Y, Austin E, Nash P J, et al. Highly scalable amplified hybrid TDM/DWDM array architecture for interferometric fiber-optic sensor systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(6): 882-888.
- [63] Lavrov V S, Plotnikov M Y, Aksarin S M, et al. Experimental investigation of the thin fiber-optic hydrophone array based on fiber Bragg gratings[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 34: 47-51.
- [64] Nash P J. Multi-channel optical hydrophone array with time and wavelength division multiplexing[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3746: 374613.
- [65] Hao X Z, Zhang H Q, Wei C L, et al. Sea trial for fiber-optic hydrophone array used in marine geophysical exploration[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2018, 37(3): 93-98.
- 郝小柱, 张汉泉, 韦成龙, 等. 光纤水听器阵列应用于海洋地震勘探的试验[J]. 热带海洋学报, 2018, 37(3): 93-98.
- [66] Cole J H, Bucaro J A, Kirkendall C K, et al. The origin, history and future of fiber-optic interferometric acoustic sensors for US Navy applications[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7753: 775303.
- [67] Dandridge A. Fiber optic interferometric sensors at sea[J]. Optics and Photonics News, 2019, 30(6): 34-41.
- [68] Eriksrud M. Seabed permanent reservoir monitoring (PRM): a valid 4D seismic technology for fields in the North Sea[J]. First Break, 2014, 32(5): 67-73.
- [69] Goodman S, Foster S, van Velzen J, et al. Field demonstration of a DFB fibre laser hydrophone seabed array in Jervis Bay, Australia[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7503: 75034L.
- [70] Foster S, Tikhomirov A, van Velzen J. Towards a high performance fiber laser hydrophone[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(9): 1335-1342.
- [71] Plotnikov M Y, Lavrov V S, Dmitraschenko P Y, et al. Thin cable fiber-optic hydrophone array for passive acoustic surveillance applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(9): 3376-3382.
- [72] Li M, Sun Z H, Zhang X L, et al. Development of high sensitivity eight-element multiplexed fiber laser acoustic pressure hydrophone array and interrogation system[J]. Photonic Sensors, 2017, 7(3): 253-260.
- [73] Gao K, Guo Z, Zhang W H, et al. Novel fiber hydrophone sound-sensitive structure and realization method thereof: CN107367321A[P]. 2017-11-21.  
高侃, 郭振, 张文华, 等. 一种新型的光纤水听器声敏结构及其实现方法: CN107367321A[P]. 2017-11-21.
- [74] Guo Z, Gao K, Yang H, et al. 20-mm-diameter interferometric hydrophone towed array based on fiber Bragg gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1106003.  
郭振, 高侃, 杨辉, 等. 外径 20 mm 的光纤光栅干涉型拖曳水听器阵列[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1106003.
- [75] Zhang F X, Jiang S D, Zhang X L, et al. Ultra-thin fiber laser hydrophone with static pressure equalization and improved response[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(24): 1968-1970.



- [76] Martins H, Marques M B, Frazão O. 300 km-ultralong Raman fiber lasers using a distributed mirror for sensing applications[J]. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18149-18154.
- [77] Jia X H, Rao Y J, Yuan C X, et al. Hybrid distributed Raman amplification combining random fiber laser based 2nd-order and low-noise LD based 1st-order pumping[J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 24611-24619.
- [78] Olsson S L I, Eliasson H, Astra E, et al. Long-haul optical transmission link using low-noise phase-sensitive amplifiers[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2513.
- [79] Rosa P, Rizzelli G, Pang X, et al. Unrepeated 240-km 64-QAM transmission using distributed Raman amplification over SMF fiber[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(4): 1433.
- [80] Fu Y, Rao Y J, Zhu R C, et al. 175 km repeaterless BOTDA with hybrid 2nd- and 3rd-order Raman random fiber laser amplification[C]//26th International Conference on Optical Fiber Sensors, September 24-28, 2018, Lausanne. Washington, D. C.: OSA, 2018: TuD2.
- [81] Cao C Y, Xiong S D, Yao Q, et al. Performance of a 400 km interrogated fiber optics hydrophone array [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9157: 91579B.
- [82] Chen W, Meng Z. Intensity and phase noise caused by stimulated Brillouin scattering[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7753: 77532G.
- [83] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [84] Hirose A, Takushima Y, Okoshi T. Suppression of stimulated Brillouin scattering and Brillouin crosstalk by frequency-sweeping spread-spectrum scheme[J]. *Journal of Optical Communications*, 1991, 12(3): 82-85.
- [85] Yoshizawa N, Imai T. Stimulated Brillouin scattering suppression by means of applying strain distribution to fiber with cabling[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(10): 1518-1522.
- [86] Willems F W, Muys W, Leong J S. Simultaneous suppression of stimulated Brillouin scattering and interferometric noise in externally modulated lightwave AM-SCM systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, 6(12): 1476-1478.
- [87] Dinda P T, Millot G, Louis P. Simultaneous achievement of suppression of modulational instability and reduction of stimulated Raman scattering in optical fibers by orthogonal polarization pumping[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2000, 17(10): 1730-1739.
- [88] Chen W, Meng Z. Effects of phase modulation used for SBS suppression on phase noise in an optical fibre [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2011, 44(16): 165402.
- [89] Du W B, Zhou P, Ma Y X, et al. Experimental study of SBS suppression with phase-modulation in all-fiber amplifier[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8192: 81921C.
- [90] White J O, Vasilyev A, Cahill J P, et al. Suppression of stimulated Brillouin scattering in optical fibers using a linearly chirped diode laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15872-15881.
- [91] Chen W, Meng Z. Effects of phase modulation on threshold of stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(3): 0305002.  
陈伟, 孟洲. 相位调制对光纤受激布里渊散射阈值的影响[J]. *中国激光*, 2011, 38(3): 0305002.
- [92] Hu X Y, Chen W, Fan L W, et al. An optical modulation method to suppress stimulated Brillouin scattering and the phase noise in a remote interferometric fiber sensing system[J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(5): 547-551.
- [93] Hu X Y, Chen W, Tu X B, et al. Theoretical and experimental study of suppressing stimulated Brillouin scattering and phase noise in interferometric fiber sensing systems with phase modulation[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(8): 2018-2022.
- [94] Hu X Y, Chen W, Sun S L, et al. The effect of modulation instability on the interferometric fiber sensing systems[C]//2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC), July 31-August 4, 2017, Singapore. New York: IEEE Press, 2017: 1-2.
- [95] Soto M A, Alem M, Chen W, et al. Mitigating modulation instability in Brillouin distributed fibre sensors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8794: 87943J.
- [96] Urricelqui J, Alem M, Sagues M, et al. Mitigation of modulation instability in Brillouin distributed fiber sensors by using orthogonal polarization pulses[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9634: 963433.
- [97] Soto M A, Ricchiuti A L, Zhang L, et al. Time and frequency pump-probe multiplexing to enhance the signal response of Brillouin optical time-domain

- analyzers[J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28584-28595.
- [98] Hu X Y, Chen W, Lu Y, et al. Suppression of spontaneous modulation instability and phase noise with a coherent seed in the interferometric fiber sensing systems[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(15): 3642-3645.
- [99] Souto F. Fibre optic towed array: the high tech compact solution for naval warfare[J]. *Acoustics 2013: Science, Technology and Amenity*, 2013: 297-301.
- [100] Rajesh R. An eight element hydrophone array using DFB fiber laser with bender bar packaging[C]//13th International Conference on Fiber Optics and Photonics, December 4-8, 2016, Kharagpur, India. Washington, D.C.: OSA, 2016: Th3A.52.
- [101] Zhang H Y, Wang X F, Zhao C. Sea trial of 16-element DFB-FL hydrophone towed array[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11340: 1134016.
- [102] Peng C Y, Zhang X L. A dynamic depth estimation method for towed optical fiber hydrophone array[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, 143(5): EL399-EL404.
- [103] Ge Q, Xu C C, Wu X Q, et al. Two noise reduction methods in interferential optical fiber sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(5): 726-728.  
葛强, 徐长春, 吴许强, 等. 干涉型光纤传感器中的双重降噪方法[J]. *中国激光*, 2008, 35(5): 726-728.
- [104] Ludlow A D, Boyd M M, Ye J, et al. Optical atomic clocks[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2015, 87(2): 637-701.
- [105] Alalusi M, Brasil P, Lee S, et al. Low noise planar external cavity laser for interferometric fiber optic sensors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7316: 73160X.
- [106] Kim S K, Stewart G, Johnstone W, et al. Mode-hop-free single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser frequency scanned with a fiber ring resonator[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(24): 5154-5157.
- [107] Meng Z, Stewart G, Whitenett G. Stable single-mode operation of a narrow-linewidth, linearly polarized, erbium-fiber ring laser using a saturable absorber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(5): 2179-2183.
- [108] Spiegelberg C, Geng J H, Hu Y D, et al. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 57-62.
- [109] Stoehr H, Mensing F, Helmcke J, et al. Diode laser with 1 Hz linewidth[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(6): 736-738.
- [110] Aflatouni F, Bagheri M, Hashemi H. Design methodology and architectures to reduce the semiconductor laser phase noise using electrical feedforward schemes[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, 58(11): 3290-3303.
- [111] Hill K O, Kawasaki B S, Johnson D C. CW Brillouin laser[J]. *Applied Physics Letters*, 1976, 28(10): 608-609.
- [112] Cowle G J, Stepanov D Y. Hybrid Brillouin/erbium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(16): 1250-1252.
- [113] Chen W, Zhang Y, Ren M, et al. Experimental study of single-longitudinal-mode Brillouin erbium-doped fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(9): 1740-1744.  
陈伟, 张艳, 任民, 等. 单纵模布里渊掺铒光纤激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(9): 1740-1744.
- [114] Shahi S, Harun S W, Dimyati K, et al. Brillouin fiber laser with significantly reduced gain medium length operating in L-band region[J]. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2009, 8: 143-149.
- [115] Zhou H J, Sun C F, Chen M, et al. Characteristics of a Brillouin-erbium fiber laser based on Brillouin pump preamplification[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(29): 7046-7051.
- [116] Zhou H J, Chen M, Chen W, et al. Brillouin-erbium fiber laser with ultra-short ring cavity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(7): 0702010.  
周会娟, 陈默, 陈伟, 等. 超短环形腔布里渊掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0702010.
- [117] Chen M, Meng Z, Tu X B, et al. Low-noise, single-frequency, single-polarization Brillouin/erbium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(12): 2041-2043.
- [118] Chen M, Meng Z, Wang J F, et al. Strong linewidth reduction by compact Brillouin/erbium fiber laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(5): 1-8.
- [119] Chen M, Meng Z, Wang J F, et al. Ultra-narrow linewidth measurement based on Voigt profile fitting [J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6803-6808.
- [120] Chen M, Wang C Y, Wang J F, et al. 53-dB phase noise suppression and Hz-range linewidth emission in compact Brillouin/erbium fiber laser[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19216-19225.

- [121] Chen M, Meng Z, Sun Q, et al. Mechanism and characteristics of a fast-tuning Brillouin/erbium fiber laser[J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 15039-15048.
- [122] Liu T T, Cui J, Chen D S, et al. A new demodulation technique for optical fiber interferometric sensors with  $3 \times 3$  directional couplers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(1): 12-15.
- [123] Li M, Xie F, Chen Z M. High stability fiber  $3 \times 3$  coupler interferometric displacement measurement system[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2010, 21(2): 235-239.  
李敏, 谢芳, 陈志敏. 高稳定的光纤  $3 \times 3$  耦合器干涉位移测量系统[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(2): 235-239.
- [124] Chen F F, Jiang Y, Jiang L.  $3 \times 3$  coupler based interferometric magnetic field sensor using a TbDyFe rod[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(8): 2085-2090.
- [125] Li C L, Tang J G, Jiang Y S, et al. An enhanced distributed acoustic sensor with large temperature tolerance based on ultra-weak fiber Bragg grating array[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(4): 1-11.
- [126] Zhang X P, Sun Z H, Shan Y Y, et al. A high performance distributed optical fiber sensor based on  $\Phi$ -OTDR for dynamic strain measurement[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 1-12.
- [127] Zhong X, Gui D L, Zhang B F, et al. Performance enhancement of phase-demodulation  $\Phi$ -OTDR using improved two-path DCM algorithm[J]. *Optics Communications*, 2021, 482: 126616.
- [128] Ma P F, Sun Z S, Liu K, et al. Distributed fiber optic vibration sensing with wide dynamic range, high frequency response, and multi-points accurate location[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 124: 105966.
- [129] He J, Li F, Zhang W T, et al. High performance wavelength demodulator for DFB fiber laser sensor using novel PGC algorithm and reference compensation method[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7753: 775333.
- [130] Zhang W T, Xia H, Pan C Z, et al. Differential-self-multiplying-integrate phase generated carrier method for fiber optic sensors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9233: 92331U.
- [131] Peng F, Hou L, Yang J, et al. An improved fixed phased demodulation method combined with phase generated carrier (PGC) and ellipse fitting algorithm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9620: 96200S.
- [132] Wu B, Yuan Y, Yang J, et al. Optimized Phase Generated Carrier (PGC) demodulation algorithm insensitive to C value[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9655: 96550C.
- [133] Volkov A V, Plotnikov M Y, Mekhregin M V, et al. Phase modulation depth evaluation and correction technique for the PGC demodulation scheme in fiber-optic interferometric sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(13): 4143-4150.
- [134] Nikitenko A N, Plotnikov M Y, Volkov A V, et al. PGC-atan demodulation scheme with the carrier phase delay compensation for fiber-optic interferometric sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(5): 1985-1992.
- [135] Huang W Z, Zhang W T, Huang J T, et al. Demonstration of multi-channel fiber optic interrogator based on time-division locking technique in subway intrusion detection[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 11472-11481.
- [136] Yao Q, Wang F Y, Xiong S D, et al. Instability mechanism of intensity-noise-induced phase noise in PGC detection system and suppression thereof[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11554: 115541L.
- [137] Liao Y, Austin E, Nash P J, et al. Phase sensitivity characterization in fiber-optic sensor systems using amplifiers and TDM[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(10): 1645-1653.
- [138] Liu F, Xie S R, Gu L J, et al. Common-mode noise suppression technique in interferometric fiber-optic sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(21): 5619-5627.
- [139] Liu F, Gu L J, Xie S R, et al. Acousto-optic modulation induced noises on heterodyne-interrogated interferometric fiber-optic sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(16): 3465-3471.
- [140] de Freitas J M. Optical crosstalk and performance in time division multiplexed derivative sensing techniques[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(18): 10615-10624.
- [141] Liu F, Xie S R, Zhang M, et al. Downhole microseismic monitoring using time-division multiplexed fiber-optic accelerometer array[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 120104-120113.
- [142] Nehorai A, Hawkes M. Performance bounds for estimating vector systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000, 48(6): 1737-1749.
- [143] Nehorai A, Paldi E. Performance analysis of two direction estimation algorithms using an acoustic vector sensor[C]//1993 IEEE International Conference on

- Acoustics, Speech, and Signal Processing, April 27-30, 1993, Minneapolis, MN, USA. New York: IEEE Press, 1993: 360-363.
- [144] Nehorai A, Paldi E. Acoustic vector-sensor array processing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(9): 2481-2491.
- [145] Wong K T, Zoltowski M D. Uni-vector-sensor ESPRIT for multisource azimuth, elevation, and polarization estimation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45(10): 1467-1474.
- [146] Wong K T, Zoltowski M D. Self-initiating MUSIC-based direction finding in underwater acoustic particle velocity-field beamspace[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(2): 262-273.
- [147] Wong K T, Zoltowski M D. Root-MUSIC-based azimuth-elevation angle-of-arrival estimation with uniformly spaced but arbitrarily oriented velocity hydrophones[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(12): 3250-3260.
- [148] Yuan Z Y, Gu X D. MUSIC algorithm based on high-order cumulant for DOA estimation using a single vector hydrophone[J]. Ship Science and Technology, 2010, 32(6): 64-67.  
袁志勇, 顾晓东. 单矢量水听器四阶累积量 MUSIC 算法对信号 DOA 的估计[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(6): 64-67.
- [149] Liang G L, Fu J, Zhang K, et al. Modified MVDR algorithm for DOA estimation using acoustic vector hydrophone[C]//2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, June 10-12, 2011, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2011: 327-330.
- [150] Liang Y, Meng Z, Chen Y, et al. A data fusion orientation algorithm based on the weighted histogram statistics for vector hydrophone vertical array[J]. Sensors, 2020, 20(19): 5619.
- [151] Tveten A B, Dandridge A, Davis C M, et al. Fibre optic accelerometer[J]. Electronics Letters, 1980, 16(22): 854-856.
- [152] Kersey A D, Jackson D A, Corke M. High-sensitivity fibre-optic accelerometer[J]. Electronics Letters, 1982, 18(13): 559-561.
- [153] Pechstedt R D, Jackson D A. Performance analysis of a fiber optic accelerometer based on a compliant cylinder design[J]. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(1): 207-214.
- [154] Cranch G A, Nash P J. High-responsivity fiber-optic flexural disk accelerometers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(9): 1233-1243.
- [155] Ames G H, Maguire J M. Erbium fiber laser accelerometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(4): 557-561.
- [156] Jackson P, Foster S, Goodman S. A fibre laser acoustic vector sensor[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7503: 750329.
- [157] Peng C Y, Zhang X L, Meng Z. Bearing estimation for optical fiber vector hydrophone with in-band resonance[J]. Applied Acoustics, 2020, 158: 107055.
- [158] Nash P, Strudley A, Crickmore R, et al. High efficiency TDM/WDM architectures for seismic reservoir monitoring[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7503: 75037T.
- [159] Kringelbotn J T, Nakstad H, Eriksrud M. Fibre optic ocean bottom seismic cable system: from innovation to commercial success[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7503: 75037U.
- [160] Furuhaug R. Fibre optic accelerometer and a method of manufacturing a fibre optic accelerometer: US8499638[P]. 2013-08-06.
- [161] Chang T Y, Wang Z M, Yang Y, et al. Fiber optic interferometric seismometer with phase feedback control[J]. Optics Express, 2020, 28(5): 6102-6122.
- [162] Yang Y, Wang Z M, Chang T Y, et al. Seismic observation and analysis based on three-component fiber optic seismometer[J]. IEEE Access, 2019, 8: 1374-1382.
- [163] Chen J D, Chang T Y, Fu Q J, et al. A fiber-optic interferometric tri-component geophone for ocean floor seismic monitoring[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2016, 17(1): E47.
- [164] Yi D, Liu F, Zhang M, et al. High-accuracy transient response fiber optic seismic accelerometer using a shock-absorbing ring as a mechanical antiresonator[J]. Optics Letters, 2019, 44(2): 183-186.
- [165] Lou W L, Liu Y M, Chen J, et al. A shallow sea geophone with optical fiber acceleration based on self-vertical structure: CN112612052A[P]. 2021-04-06.  
娄威龙, 刘英明, 陈剑, 等. 一种基于自垂直结构的光纤加速度浅海检波器: CN112612052A[P]. 2021-04-06.
- [166] Cranch G A, Miller G A, Kirkendall C K. Fiber laser sensors: enabling the next generation of miniaturized, wideband marine sensors[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8028: 80280I.
- [167] Foster S B, Cranch G A, Harrison J, et al. Distributed feedback fiber laser strain sensor

- technology[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3514-3530.
- [168] Jin M Q, Ge H L, Li D M, et al. Three-component homovibrational vector hydrophone based on fiber Bragg grating F-P interferometry[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(30): 9195-9202.
- [169] Zhang X L, Zhang F X, Jiang S D, et al. Short cavity DFB fiber laser based vector hydrophone for low frequency signal detection[J]. *Photonic Sensors*, 2017, 7(4): 325-328.
- [170] Liu F, Yi D, Chen Y, et al. Common-mode noise self-suppressed 3-component fiber optic accelerometer based on low-reflectivity Bragg gratings[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(7): 1596-1599.
- [171] Cranch G A, Miller G A, Kirkendall C K. Fiber-optic, cantilever-type acoustic motion velocity hydrophone[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 132(1): 103-114.
- [172] Cranch G A, Lane J E, Miller G A, et al. Low frequency driven oscillations of cantilevers in viscous fluids at very low Reynolds number[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(19): 194904.
- [173] Lou J W, Cranch G A, Miller G A, et al. Miniaturization of acoustic vector sensors enabled by viscous fluids: towards fiber laser hair sensors[C]//*SENSORS*, 2013 IEEE, November 3-6, 2013, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2013: 1-4.
- [174] Masoudi A, Belal M, Newson T P. A distributed optical fibre dynamic strain sensor based on phase-OTDR[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(8): 085204.
- [175] Fang G S, Xu T W, Feng S W, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometer based on phase-generated carrier algorithm[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(13): 2811-2816.
- [176] He X G, Xie S R, Liu F, et al. Multi-event waveform-retrieved distributed optical fiber acoustic sensor using dual-pulse heterodyne phase-sensitive OTDR[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 442-445.
- [177] He X G, Zhang M, Gu L J, et al. Performance improvement of dual-pulse heterodyne distributed acoustic sensor for sound detection[J]. *Sensors*, 2020, 20(4): 999.
- [178] Lu Y L, Zhu T, Chen L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(22): 3243-3249.
- [179] Pan Z Q, Liang K Z, Ye Q, et al. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8311: 83110S.
- [180] Lu B, Wu B Y, Gu J F, et al. Distributed optical fiber hydrophone based on  $\Phi$ -OTDR and its field test [J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 3147-3162.
- [181] Zabihi M, Chen Y S, Zhou T, et al. Continuous fading suppression method for  $\Phi$ -OTDR systems using optimum tracking over multiple probe frequencies[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(14): 3602-3610.
- [182] Zhou J, Pan Z Q, Ye Q, et al. Phase demodulation technology using a multi-frequency source for discrimination of interference-fading induced false alarms in a  $\Phi$ -OTDR system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(9): 0905003.  
周俊, 潘政清, 叶青, 等. 基于多频率综合鉴别  $\Phi$ -OTDR 系统中干涉衰落假信号的相位解调技术[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0905003.
- [183] Chen D, Liu Q W, He Z Y. Phase-detection distributed fiber-optic vibration sensor without fading-noise based on time-gated digital OFDR[J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 8315-8325
- [184] Wu Y, Wang Z N, Xiong J, et al. Interference fading elimination with single rectangular pulse in  $\Phi$ -OTDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13): 3381-3387.
- [185] Lu Y, Zhang X L, Liang C L, et al. Fading noise reduction in distributed vibration measurements utilizing multi-wavelength based  $\Phi$ -OTDR[C]//*26th International Conference on Optical Fiber Sensors*, September 24-28, Lausanne, Vaud, Switzerland. Washington, D. C.: OSA, 2018: TuE21.