

激光与光电子学进展

无源干涉型光纤布拉格光栅水听器研究进展

胡琪浩, 朱小谦, 马丽娜*, 戚悦, 尚凡, 卞玉洁

国防科技大学气象海洋学院, 湖南 长沙 410073

摘要 光纤水听器作为一种新型水声传感器,对我国经略海洋战略有着重要意义。为了满足光纤水听器日益增长的实际应用需求,发展低成本、高集成度和高灵敏度的光纤传感技术尤为迫切。光纤光栅水听器因其易大规模成阵、高性价比和高可靠性成为下一代光纤水听器阵列的重要技术方案。本文从传感系统、探头结构和关键技术三个方面对光纤布拉格光栅水听器技术的进展进行了全面综述。此外还对目前光纤光栅水听器传感技术发展最为关键的干端信号解调问题进行了较为详细的论述。本文对于深入研究光纤光栅水听器系统的关键技术、提升其系统探测性能和推进其实际应用具有重要的指导意义。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 光纤传感; 光纤水听器; 瑞利散射

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223405

Advances in Passive-Interferometric Type Fiber Bragg Grating-Based Hydrophones

Hu Qihao, Zhu Xiaoqian, Ma Lina*, Qi Yue, Shang Fan, Bian Yujie

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

Abstract As a new type of underwater acoustic sensor, fiber optic hydrophone is of great significance to China's utilization and marine strategy planning. To satisfy the ever-growing demand for low-cost, highly integrated, and high sensitive fiber optic hydrophones, there is an urgent need to advance fiber sensor technologies. A fiber Bragg grating (FBG)-based hydrophone exhibits advantages such as ease of large-scale array, cost-effectiveness, and high reliability, making it an important technical solution for the next generation of hydrophone arrays. This study comprehensively summarizes the FBG-based hydrophone based on the aspects of sensing systems, hydrophone probes, and key technologies. Additionally, signal demodulation at the dry end, which is a key technique in the development of FBG-based hydrophones, is addressed. This study has significant guiding significance for intensive research of key technologies, improvement of detection performance, and promotion of practical application of fiber grating hydrophone system.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; optical fiber sensing; fiber optic hydrophone; Rayleigh scattering

1 引言

光纤水听器凭借声压灵敏度高、动态范围大、易于大规模组阵等诸多优点,在未来水下预警探测体系、海洋资源探测等领域中将有着极为重要的应用前景。目前光纤水听器正朝着高分辨率、大规模、小尺寸、高可靠性等方向发展。以大型时分、空分、波分混合复用系统为代表的传感阵列规模从数十基元逐渐扩展到上千基元,传感范围和测试精度的提升都让其备受关注。

目前实用化程度较高的两种光纤水听器是传统的基于 Michelson 干涉仪 (MI) 的光纤水听器和光纤光栅水听器。

光纤光栅的物理本质是光纤纤芯折射率呈周期性调制而引起不同传输模式间的耦合。根据光纤光栅调制周期大小的不同,原本在光纤纤芯中前向传输的纤芯模式会与前向或者后向传输的纤芯或者包层模式在一定波长范围内发生能量交换(耦合),进而导致纤芯中光信号的透射能量或反射能量发生改变^[1-2],一般

收稿日期: 2022-12-27; 修回日期: 2023-02-21; 录用日期: 2023-03-01; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(61901488)

通信作者: *mln_c7@nudt.edu.cn

分为光纤布拉格光栅 (FBG) 和长周期光纤光栅 (LPFG), 本文所提的光纤光栅是指会发生向后反射的 FBG。光纤光栅由于具备抗电磁干扰能力强、动态范围大、体积小、成本低、制备周期短、便于复用等优点, 在光纤激光器、光纤传感器和光纤波分复用等领域有重要应用价值^[3], 也为光纤水听器提供了新的技术方案。

相比传统光纤水听器需要搭配多种光学器件组合使用, 基于光纤光栅的干涉型光纤水听器的水下湿端结构除了光纤光栅外无需额外器件, 在一根光纤上即可实现高度集成的传感阵列结构。因其在可靠性、大规模及小型化方面的显著优势, 基于光纤光栅的干涉型水听器已经成为近年来各国国防科技、水下环境监测和海底资源勘探等领域的研究热点。

2 光纤光栅水听器及调制解调技术

基于光纤光栅的光纤水听器可以分为三类: 单光纤光栅水听器、光纤激光水听器和法布里-珀罗 (F-P) 干涉型光纤水听器。光纤激光水听器作为一种有源光纤光栅传感器, 传感原理就决定了其阵列结构相对复杂, 从而在提高工程实用性和可靠性等方面具有困难^[4]。目前, 还不能同时满足单基元的高性能指标和阵列实现大复用数目, 还没有大规模光纤激光水听器实用阵列的报道。

基于光纤光栅的干涉型光纤水听器因其具有小型化、易于大规模集成复用、可靠性高、制备成本低等特点, 在实际应用中往往更受青睐。其传感系统大致可以分为两大类, 一类光纤光栅本身参与传感, 其中心波长或谐振峰幅值会因外界扰动而变化, 再经过非平衡干涉仪转化为相位信号。这种传感系统在仅有一个光纤光栅的情况下, 也能集成多个光纤光栅, 但是各个光纤光栅之间相互独立, 不发生谐振, 因此这一类水听器也称为单光纤光栅水听器。另一类传感器中光纤光栅仅作为光纤反射镜, 通常成对出现组成 F-P 干涉仪结构, 利用 F-P 腔中的光纤进行信号探测, 这类型的水听器通常称为匹配干涉型或者 F-P 干涉型光纤水听器。

2.1 单光纤光栅水听器

单个光纤光栅干涉型水听器技术是最早被提出的, 也是结构和原理最简单的一类。这种传感器利用外界环境会影响光纤光栅反射波长这一特点实现对外界的传感, 根据系统和信号解调方法的不同又可以分为强度调制型和干涉型两类。强度调制型传感器的原理是将中心波长的变化转化为光强的变化, 解调需要高性能激光器或波长扫描装置^[5-6], 并且其探测频带、灵敏度低于传统的干涉型光纤水听器, 因此强度调制型水听器应用价值有待进一步挖掘。

干涉型光纤光栅传感通常是利用一个非平衡干涉仪把光纤光栅中心波长的变化转化为干涉信号的相位变化, 再通过相位检测技术解调相位变化来实现高灵

敏度传感, 典型的传感结构^[7]如图 1 所示。当光通过环形器后进入光纤光栅水听器探头, 在光纤光栅处返回的光信号再经环形器后进入 MI 或者 Mach-Zehnder 干涉仪 (MZI) 产生干涉信号, 该干涉信号经探测器转换为电信号进行解调。当光纤光栅受到应力作用时, 由于光纤的弹性形变和弹光效应导致光纤光栅周期和折射率发生变化, 从而使光纤光栅的谐振波长发生漂移。因此该传感系统的解调方案即为通过光纤干涉仪检测干涉光相位变化来计算波长的变化, 再由波长和应变量的对应关系解调外界物理量。

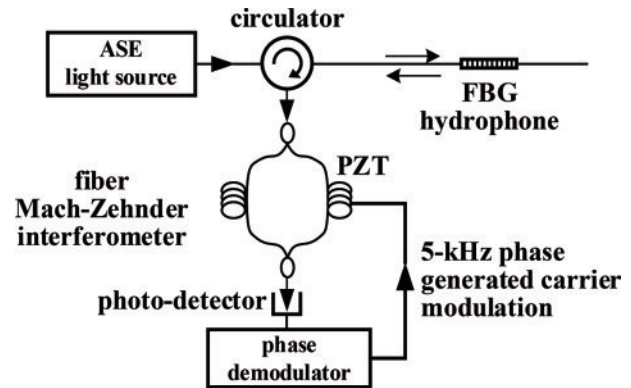


图 1 典型的单个光纤光栅干涉型传感实验系统^[7]

Fig. 1 Experimental setup for typical single fiber grating interferometric sensing^[7]

单个光纤光栅干涉型传感器经过多年的发展在多种物理量传感方面得到应用。1992 年, 美国海军实验室 (NRL) 利用单个光纤光栅实现了 $0.6 \text{ n}\epsilon/\text{Hz}^{1/2}$ 的高灵敏度应变传感^[8]。1996 年, 该团队又报道了基于单个光纤光栅的一维加速度计^[9]。Weis 等^[10]通过实验结合理论研究指出, 光纤光栅反射光的相干长度会限制解调干涉仪的臂差, 因此实际应用中需要根据需求综合考虑探测精度和灵敏度。

基于单个光纤光栅的干涉型水听器也能拓展成阵列传感系统, 但是在这种系统中各个光纤光栅性能独立, 不会形成谐振腔, 这类型传感系统常用宽带光源作为信号光。1993 年, Kersey 等^[11]提出利用非平衡干涉仪和参考光纤光栅消除系统漂移影响, 其实验系统如图 2 所示, 该方案的提出也为大规模时分复用光纤光栅传感系统奠定了基础。2005 年, Cranch 等^[12]用宽带锁模短脉冲激光器作为光源研究了两条光纤光栅时分-波分复用阵列的传感性能, 同时还研究了传感器间的串扰问题。

2005 年, 黄俊斌等^[13]研究了光纤光栅波分复用阵列振动传感性能, 基于单光纤光栅的复用系统得到了较为广泛的研究^[14-18]。这种利用光纤光栅波长漂移特性的传感阵列通常选择宽带光源以便容纳更多的信号通道, 实际应用中常用于温度、应力等物理量的传感, 但是受到宽带光源本底噪声的限制, 不太适合传感水

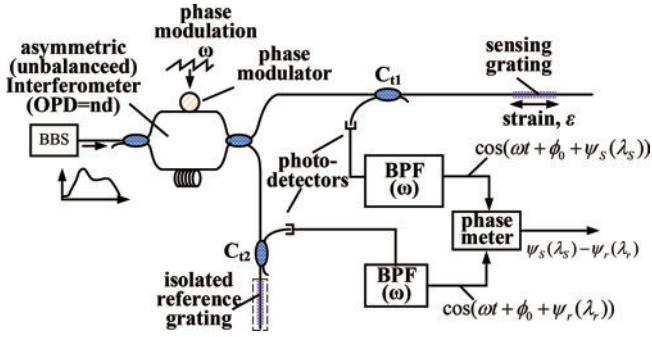


图 2 基于补偿 FBG 的传感系统^[11]

Fig. 2 Compensated FBG based sensing system^[11]

声等微弱信号^[12]。2018 年, Ma 等^[19]提出用相移光纤光栅作为滤波器获取窄带光, 极大程度降低了系统的本底噪声。

总的来说, 单光纤光栅水听器在原理上相对简单, 也能够通过适当改进探头结构设计和增大干涉仪臂差提高传感灵敏度^[7,20], 但是解调干涉仪的臂差受 FBG 反射光相干长度的限制, 实际系统需要对探测精度和灵敏度进行权衡选择^[10]。此外光纤光栅在实际传感应用时无法避免地会受到温度和应力交叉敏感的影响, 若是进行针对性补偿设计又会增加探头的复杂程度, 因此单光纤光栅水听器阵列实际应用的案例报道较少。

2.2 F-P 干涉型光纤水听器

匹配干涉型光纤光栅光纤水听器传感基元是两个

光纤光栅串联形成的 F-P 干涉仪 (FBG-FPI), 实际应用中也能通过级联多个 F-P 腔阵列实现大范围传感。应用时只需将非平衡匹配干涉仪 (CIF) 两臂的臂差调整到恰好等于 F-P 腔光纤长度的两倍, 即构成路径匹配条件。FBG-FPI 由于其优良的滤波特性以及简单可靠的光路结构等, 自问世以来就成为光纤传感领域最为重要的干涉仪之一, 随着光纤通信和光纤传感的迅速发展, FBG-FPI 更是得以大量研究和广泛使用。基于这种方案的光纤水声探测系统由于传感频带易于控制且结构简单, 水下湿端传感部分不再需要耦合器、法拉第旋镜等光学器件, 大大提高系统稳定性并且降低系统成本, 实际应用潜力巨大, 是当前光纤水声探测领域的研究热点。

基于 FBG-FPI 的匹配干涉型水声探测系统按匹配干涉仪所处位置的不同可以分为匹配干涉仪前置、中置和后置式结构, 如图 3 所示。为保证系统的本底相位噪声, 通常采用窄线宽高相干激光器作为询问光源。激光器的输出采用声光调制器 (AOM) 调制成脉冲激光。脉冲激光经过掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大后再经 MZI 形成一对光脉冲, 其中 MZI 的两臂光程差与光纤光栅水听器两个光栅之间往返一次的光程差完全相同; MZI 的一个臂部分光纤绕在压电陶瓷 (PZT) 环上用于产生相位调制。在实际应用场景中, 三种传感光路应搭配不同的偏振衰落抑制方案。

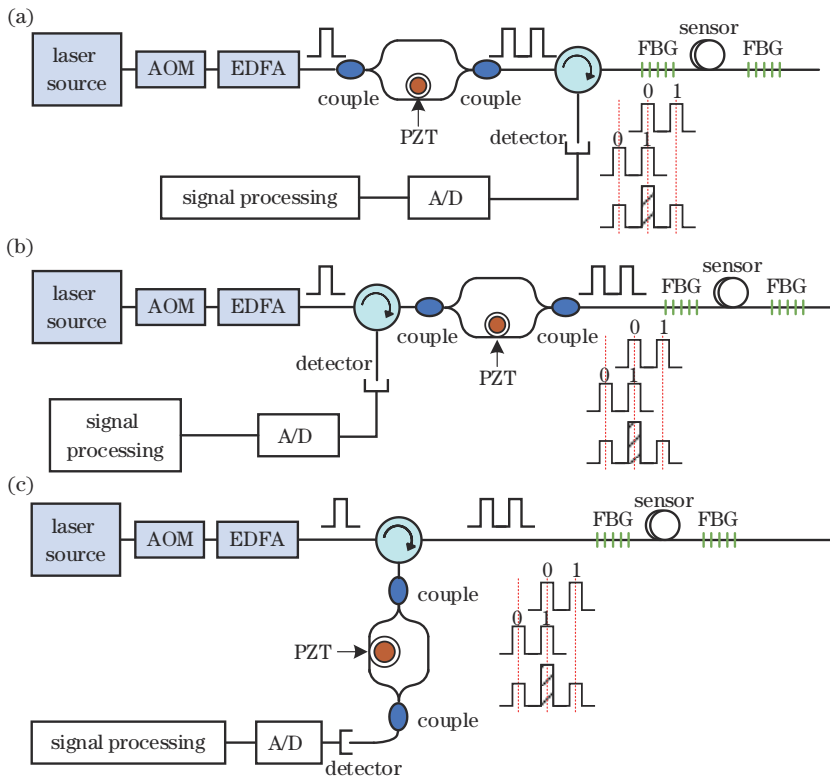


图 3 三种常见的 FBG-FPI。(a) 干涉仪前置式; (b) 干涉仪中置式; (c) 干涉仪后置式

Fig. 3 Three common types of FBG-FPI. (a) Pre-placed; (b) mid-placed; (c) post-placed

根据导致光波干涉相位变化的方式可将基于 FBG-FPI 腔的光纤水声传感系统主要分成两类,一类是利用光纤光栅波长漂移实现相位解调,这种类型的传感基本原理和上述单光纤光栅水听器类似,只是借助 F-P 腔结构让整体探测灵敏度得到大幅提高。NRL 的 Cranch 等^[21-23]也对干涉型 FBG-FPI 腔传感系统进行了较为深入的研究。该团队在系统中采用宽带锁模激光器(MLL)作为信号光源,分别基于 MZI 和 MI 两种匹配干涉仪进行了研究,实验中构建了两条时分-波分复用 FBG-FPI 腔传感阵列,其中一条可以作为参考臂对多参量交叉敏感进行补偿,实验系统如图 4 所示。通过实验和理论对比证明了 FBG-FPI 腔相比于单个光纤光栅阵列传感其灵敏度能提升几十倍。实验中在光源和干涉仪之间加入了退偏器件(LD/PS)来减小偏振衰落的影响,此外还分析了信号串扰、系统探测带宽、基元间距、动态范围等因素的影响。总的来说,这种传感结构相比单个光纤光栅水听器传感系统有一定优势,但是受光源和相位变化方式的限制,在门槛较高的水声探测领域依然不够实用。

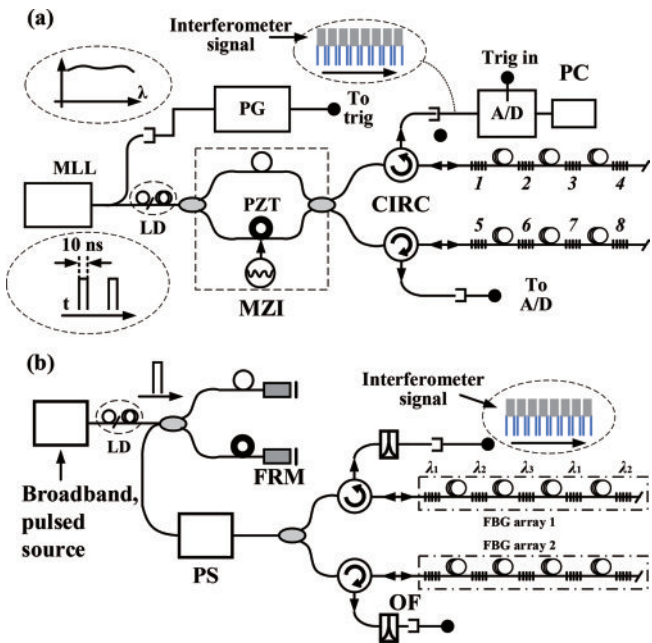


图 4 采用宽带光源的 FBG-FPI 传感系统^[21-23]。(a) MZI 解调; (b) MI 解调
Fig. 4 FBG-FPI based sensing system using broadband light source^[21-23]. (a) MZI based demodulation; (b) MI based demodulation

另一类是光纤光栅波长不变,仅测量两光栅之间光纤的扰动引起的相位变化,这种传感系统常采用窄线宽激光,本底噪声比较小;另外该系统常借助于水听器探头实现高灵敏度水声信号传感,其声压灵敏度远超上述光纤光栅波长漂移相位检测手段,是实际应用中常用的传感方案。

20 世纪 90 年代初, NRL 的 Morey 等^[24]首次对采

用成对光纤光栅构成 F-P 腔干涉仪的复用系统进行了分析,采用中心波长不同的 FBG 对实现复用技术,再用路径匹配干涉仪对各个 FBG-FPI 进行解调。这种结构可以极大地减小熔接点和耦合器的数量,使传感系统更为简单紧凑。1991 年,该团队研究指出,FBG-FPI 的窄线宽特性可以提高传感灵敏度,并且对 FBG-FPI 腔的复用能力进行了探讨,其中基于 MZI 的匹配干涉波分复用实验系统如图 5 所示。对于时分和波分混合复用系统,可以采用不同波长 FBG 交叠的阵列结构,减少多次反射光脉冲在时间上重叠的可能性,从而降低串扰,提高阵列的复用数目。该报道展示了 FBG 在水声探测中的巨大潜力,拉开了基于 FBG-FPI 腔光纤水听器发展的序幕^[25]。

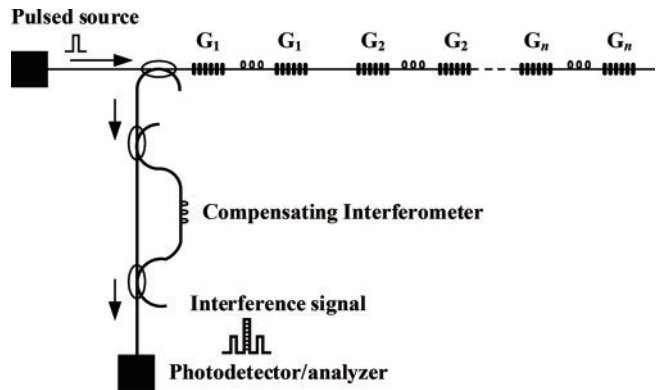


图 5 匹配干涉型 FBG-FPI 传感器时分复用系统^[25]
Fig. 5 Time division multiplexing system for matched interferometric FBG-FPI sensor^[25]

1999 年, Baldwin 等^[26]实验证明了 FBG-FPI 匹配干涉系统能够传感信号,但是当时信号解调结果不够理想。随着 NRL 对光学光栅水听器研究的不断深入,基于上述 FBG-FPI 干涉传感结构的 TB-33 型超细线光纤水听器拖曳阵已经于 2006 年量产并且列装美国海军。该阵列系统相比前一代细线阵在系统可靠性方面有了显著改善,该类型声呐阵列采用超低反射率干涉型光纤光栅水听器结构,结合时分与波分复用技术,仅使用 4 根光纤即可实现多达上百条通道的水声信号采集。通过降低信号相干噪声、温度及应力变化导致的相位噪声,改进探头提高信噪比,最终实现降噪约 70 dB^[27]。

2007 年,日本防卫局正式报道了基于非平衡 MI 解调的 FBG-FPI 时分复用水听器技术,计算结果表明,通过合理设计光纤光栅的反射率参数可以平衡干涉光强,以此提高时分复用数量、降低通道间串扰的影响。实验中光栅反射率从 -30 dB 到 -5 dB 不等,使用窄线宽光源验证了系统的传感性能^[28],实现了 4 kHz 频响起伏小于 1 dB 的效果。次年,该团队又验证了 FBG-FPI 波分复用水听器阵列的有效性^[29],实现结果显示,波分复用结构并不会影响各通道的性能。

另一个成功的商用 FBG-FPI 传感系统是挪威 Optoplan 公司研制的海底地震及油气探测系统^[30-32]。早在 21 世纪初期,该公司提出了更加实用的湿端光路极简但调制解调系统相对复杂的干涉型光纤光栅矢量传感系统。2003 年,该团队利用多对中心波长一致的弱反射率光纤光栅用于海底地震波探测,同时设计了三分量(3C)矢量水听器探头探测地震波方位^[33]。

在先后突破偏振诱导信号衰落、时分串扰、大规模时分波分复用等关键技术瓶颈后^[34-35],OptoPlan 团队在沿岸海港完成了小规模的海上部署安装和性能测试,传感系统示意图如图 6 所示^[34]。单脉冲经一个 MZI 后生成与光纤光栅间距相匹配的脉冲对,注入光纤光栅阵列前先经过相位调制器和偏振调制器用于消除偏振衰落、抑制信号串扰和抑制瑞利散射。

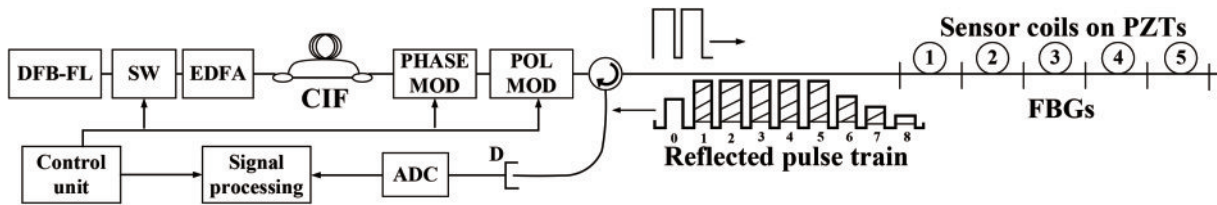


图 6 OptoPlan 团队提出的干涉型 FBG 水听器传感系统^[34]

Fig. 6 Interferometric FBG based hydrophone sensing system proposed by OptoPlan^[34]

随着在线刻写无熔点超弱光纤光栅阵列技术的成熟^[36],基于超弱光纤光栅的大范围声压传感阵列技术也得到飞速发展。2015 年,Wang 等^[37]基于平衡 MI 构建了包含 500 个相同超低反射率光纤光栅的传感阵列,实验结果显示最小可测声压为 0.122 Pa,传感系统示意图如图 7(a)所示。需要注意的是,要使平衡干涉仪能有效测量到干涉信号,脉冲持续时间内在光纤中

该传感系统充分发挥了 FBG-FPI 成本低、全光纤化、易于集成和复用的特点,开辟了无源干涉型光纤光栅实际应用的新篇章。此外该系统的问世也帮助该团队于 2008 年在同类型产品的竞争中脱颖而出,成功获得 Ekofisk 油田永久式储量监测系统建设合同。整个系统在 200 km 的传感光缆上集成了 4000 个 4C 传感基元,每个 4C 基元由 x 、 y 、 z 三个正交方向的加速度计、一个声压传感器和一个参考干涉仪组成^[32]。实际应用后的反馈也表明了干涉型 FBG 阵列具有极高的可靠性和耐久性等优势,由于阵列中未使用耦合器、复用器等光器件,同时熔点较少,因此系统具备小型化优势的同时稳定可靠。也是目前全球干涉型光纤光栅传感系统中最成功的商业化应用案例。

的路程必须大于最近 FBG 之间的间距。2017 年,Zhou 等^[38]提出了基于非平衡 MI 的 499 基元、2.5 km 的传感阵列,并测量了其振动传感性能,得到了 0.024 rad/Pa 的相位灵敏度。后续该团队又基于类似结构实现了水声信号测量,传感系统如图 7(b)所示,结果显示,该系统能够实现甚低频段、宽频带、高灵敏度水声信号的探测^[39]。

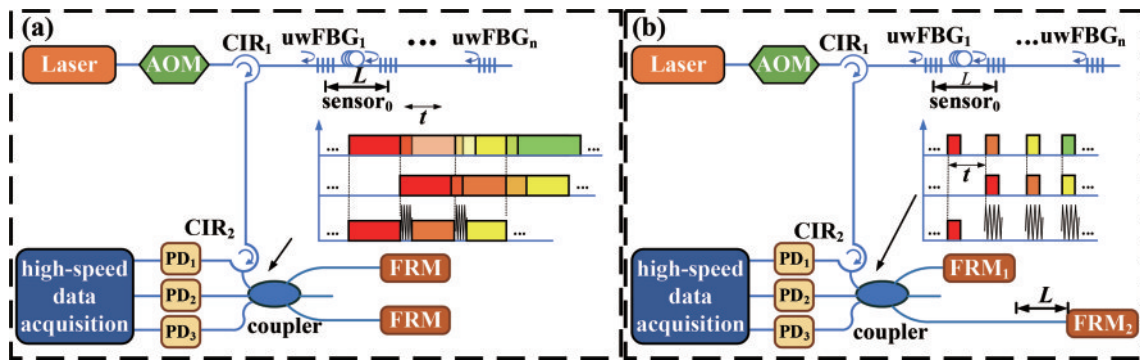


图 7 两种 FBG 阵列传感系统。(a) 平衡 MI 传感系统^[37]; (b) 非平衡 MI 传感系统^[39]

Fig. 7 Two types of FBG array based sensing system. (a) Balanced MI sensing system^[37]; (b) imbalanced MI sensing system^[39]

随着研究的不断深入,FBG-FPI 在轻量化和精细化方向也取得了一定进展。2009 年,高侃等^[40]基于 FBG-FPI 结合空分-波分-时分复用技术构建了外径仅 20 mm 的 32 基元拖曳水听器阵列,如图 8 所示。对于我国超小型化水听器阵列的工程化应用具有重要意义。

基于 FBG-FPI 的干涉型光纤水听器不仅拥有传统光纤水听器灵敏度高的特点,同时还具备动态范围大、易于大规模复用组网成阵等独特优势,可以说是光纤水听器技术的集大成者,随着制备工艺和信号解调方法的进步,该技术的应用范围有望得到进一步拓展。

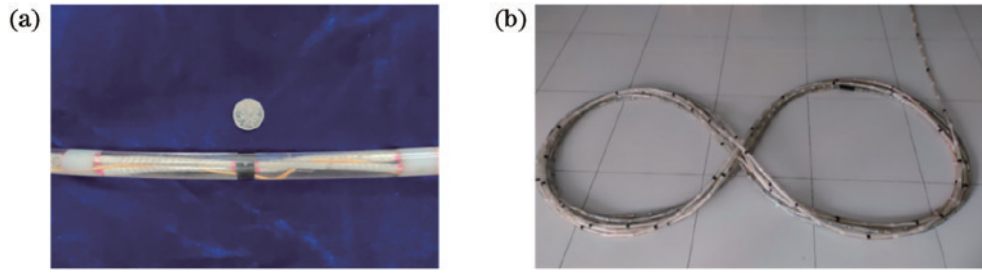


图 8 FBG-FPI水听器阵列^[40]。(a) 外径 20 mm 的水听器阵列局部图；(b) 32 基元拖曳水听器阵列实物图
Fig. 8 FBG-FPI hydrophone array^[40]. (a) Partial hydrophone array with 20 mm diameter; (b) picture of 32-element FBG towed hydrophone array

2.3 光纤光栅水听器主要性能指标

描述标量光纤水听器的指标很多,有一套完整的指标体系,其中相位灵敏度及其频率响应是完全由探头设计所决定的。相位灵敏度是由声信号引起的光纤水听器干涉仪两臂相位差 $\Delta\phi$ 与在声场中引入水听器前存在于水听器声中心位置处的自由场声压的比值,单位为 rad/Pa,定义式为

$$M_p = \frac{\Delta\phi}{p}. \quad (1)$$

相位灵敏度能够确切反映光纤水听器对水声信号的响应能力,是光纤水听器灵敏度的首选定义。在此基础上引申出了相位灵敏度级的概念,其定义式为

$$M = 20 \lg \left(\frac{M_p}{M_r} \right), \quad (2)$$

式中,基准值 $M_r = 1 \text{ rad}/\mu\text{Pa}$ 。用相位灵敏度级表示往往更加简单直观,也是实际应用中常用的光纤水听器性能衡量参数。

频率响应是光纤水听器探头对不同频率声压信号的相位灵敏度响应情况,可通过统计光纤水听器对不同频率声压信号的声压灵敏度级得出。

2.4 光纤光栅水听器调制解调技术

无论是单光纤光栅干涉型水听器还是 F-P 干涉型光纤水听器,其传感原理均是基于光纤干涉原理,通过光强变化推导出干涉光的相位变化。考虑到 F-P 干涉型水听器更加典型、实用,本节以 F-P 干涉型水听器为例介绍干涉型水听器的常用调制解调方法和性能指标。FBG-FPI 是通过腔中的光纤拾取声压导致的应变信号,水下声压的变化会引起腔长的变化从而引起相位变化。设 FBG-FPI 腔长 L 远小于光源相干长度,纤芯折射率为 n ,则 FBG-FPI 的相位差为

$$\varphi_0 = \frac{4\pi nL}{\lambda}, \quad (3)$$

式中, λ 为 FBG 的中心波长,可看成是直流相位差。实际应用时一般会对 F-P 腔内光纤进行增敏处理,使得传感光纤中相位变化主要来自于光纤的纵向应变 $\Delta\varepsilon$,外界信号引起的相位变化即交流相位差可表示为

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \kappa \Delta\varepsilon, \quad (4)$$

式中, κ 为一个固定系数,与光纤光栅水听器的传感光纤增敏结构有关。由干涉光强计算公式可知,光纤水听器中两束光发生干涉时得到的干涉光强为

$$I_1 = I_{DC} + I_{AC} \cos[\varphi_s(t) + \phi_n], \quad (5)$$

式中: I_{DC} 为直流光强,与两束光的强度有关; I_{AC} 为交流系数项,由发生干涉时两束光的光强和偏振状态决定; $\varphi_s(t)$ 为外界信号引起的随时间变化的相位差; $\phi_n = \varphi_0 + \varphi_n$ 为光纤水听器工作点,其中 φ_n 为由于外界环境扰动导致相位差的随机漂移量,也称相位随机衰落,是所有光纤干涉仪用于传感时所面临的共性问题。在光学相位天然的高灵敏度物理本质与光纤细长的结构特点共同作用下,一段光纤中传输光的相位延迟很容易受到环境扰动而随机游走,这导致光纤干涉仪中两臂的原始相位差也是受环境扰动而随机游走的状态,这为从干涉仪的光强变化中提取水声信号的过程带来一系列问题。包括光纤光栅水听器在内的光纤干涉仪用于传感时信号调制解调均是基于相位随机衰落抑制技术。目前,在光纤光栅干涉型水听器中常用的随机相位衰落抑制技术主要包括相位生成载波 (PGC) 调制解调技术和外差调制解调技术两种。

从基本原理上而言,PGC 调制解调技术是通过引入高频调制信号,并将待传感信号加载在所引入的高频调制信号上,通过在人为引入的高频调制信号附近提取待传感信号来避免低频工作点漂移的影响,实际应用中通常用 PZT 引入高频相位调制项。所引入的高频调制信号为标准余弦信号 $C \cos(\omega_0 t)$,其中 C 为调制幅度, ω_0 为调制频率。引入高频调制信号后,使光电探测器探测到的电信号强度为

$$V = A + B \cos[C \cos(\omega_0 t) + \varphi_s(t) + \phi_n], \quad (6)$$

式中: V 为光电流; A 为光电流的直流部分; B 为光电流的交流项系数;信号项 $\varphi_s(t)$ 与载波项 $C \cos(\omega_0 t)$ 叠加,使得解调过程可以根据这一人为施加的稳定的高频项展开,这是 PGC 调制解调技术的核心思想。令 $\varphi(t) = \varphi_s(t) + \phi_n$,将式 (6) 通过 Bessel 函数形式展开可得:

$$V = A + B \{ [J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos(2k\omega_0 t)] \cos[\varphi(t)] - 2 \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos[(2k+1)\omega_0 t] \} \sin[\varphi(t)] \quad (7)$$

式中, $J_k(C)$ 为第 k 阶 Bessel 函数。将式(7)分别乘以 $G \cos(\omega_0 t)$ 和 $H \cos(2\omega_0 t)$ 进行相干检测可得:

$$GA \cos(\omega_0 t) + GB J_0(C) \cos(\omega_0 t) \cos[\varphi(t)] + GB \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \{ \cos[(2k+1)\omega_0 t] + \cos[(2k-1)\omega_0 t] \} \cos[\varphi(t)] - GB \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cdot \{ \cos[2(k+1)\omega_0 t] + \cos(2k\omega_0 t) \} \sin[\varphi(t)], \quad (8)$$

$$HA \cos(2\omega_0 t) + HB J_0(C) \cos(2\omega_0 t) \cos[\varphi(t)] + HB \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \{ \cos[(2k+2)\omega_0 t] + \cos[(2k-2)\omega_0 t] \} \cos[\varphi(t)] - HB \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cdot \{ \cos[(2k+3)\omega_0 t] + \cos[(2k-1)\omega_0 t] \} \sin[\varphi(t)]. \quad (9)$$

由于调制频率 ω_0 远大于被测信号频率 $\omega_{s1}, \omega_{s2}, \dots, \omega_{sn}$, 所以式(8)和式(9)在经过低通滤波后所有含 ω_0 及其倍频项均被滤去, 得到两个低通项, 即

$$LF_1 = -GBJ_1(C) \sin[\varphi(t)], \quad (10)$$

$$LF_2 = -HBJ_2(C) \cos[\varphi(t)]. \quad (11)$$

式(10)和式(11)经微分后得到:

$$d(LF_1) = -GBJ_1(C) \cos[\varphi(t)] \frac{d[\varphi(t)]}{dt}, \quad (12)$$

$$d(LF_2) = HBJ_2(C) \sin[\varphi(t)] \frac{d[\varphi(t)]}{dt}. \quad (13)$$

由式(10)乘以式(13)得:

$$C_1 = -GHB^2 J_1(C) J_2(C) \sin^2[\varphi(t)] \frac{d[\varphi(t)]}{dt}. \quad (14)$$

由式(11)乘以式(12)得:

$$C_2 = GHB^2 J_1(C) J_2(C) \cos^2[\varphi(t)] \frac{d[\varphi(t)]}{dt}. \quad (15)$$

式(15)减去式(14)得:

$$C_2 - C_1 = GHB^2 J_1(C) J_2(C) \frac{d[\varphi(t)]}{dt}. \quad (16)$$

对式(16)积分, 得到:

$$GHB^2 J_1(C) J_2(C) \varphi(t). \quad (17)$$

式(17)经过高通滤波后并除以系数 $GHB^2 J_1(C) J_2(C)$, 可将被测信号 $\varphi(t)$ 解调出来。式(10)~(16)算法也称为微分交叉相乘相减算法(DCM)。

外差调制解调技术与 PGC 调制解调技术类似, 同样是通过引入高频调制信号, 并将待传感水声信号加载在所引入的高频调制信号上, 通过在人为引入的高频调制信号附近提取水声信号来避免低频工作点漂移的影响。与 PGC 调制解调技术不同的是, 外差调制解调技术所引入的高频调制信号为标准余弦信号 $2\pi f_m t$, 其中 f_m 为调制频率。引入高频调制信号后, 光纤光栅水听器的输出为

$$V = A + B \cos[2\pi f_m t + \varphi(t)]. \quad (18)$$

将含有外差载波信号的干涉光进行光电转换后, 分别与 $C \cos(2\pi f_m t)$ 和 $C \sin(2\pi f_m t)$ 相乘, 可获得:

$$V_{y1} = AC \cos(2\pi f_m t) + B \cos[2\pi f_m t + \varphi(t)].$$

$$C \cos(2\pi f_m t) = AC \cos(2\pi f_m t) + \frac{1}{2} BC \{ \cos[2\pi \cdot 2f_m t + \varphi(t)] + \cos[\varphi(t)] \}, \quad (19)$$

$$V_{y2} = AC \sin(2\pi f_m t) + B \cos[2\pi f_m t + \varphi(t)].$$

$$C \sin(2\pi f_m t) = AC \sin(2\pi f_m t) + 12BC \{ \sin[2\pi \cdot 2f_m t + \varphi(t)] - \sin[\varphi(t)] \}. \quad (20)$$

将式(19)和式(20)进行低通滤波后同样采用类似 DCM 算法进行后续计算, 整个算法流程如图 9 所示。

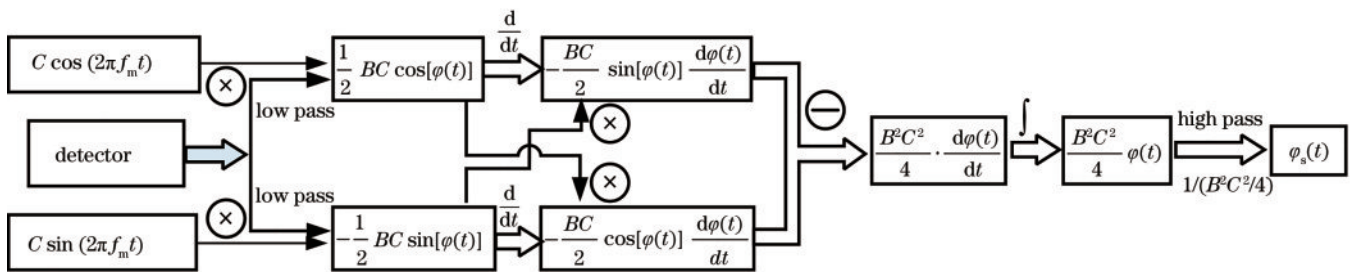


图 9 外差信号解调计算流程

Fig. 9 Heterodyne signal demodulation calculation process

作为两种典型的基本调制解调方案, PGC 方案和 外差解调方案均需要针对匹配干涉的结构设计具体实

现, 当前都已经具有较好的实验效果甚至实际应用 效果。

3 光纤光栅水听器探头及增敏技术

自光纤水听器概念提出以来,国内外各类型光纤水听器被不断研究,而光纤水听器探头是整个传感系统的一个重要组成部分,结合不同应用场景与指标要求,对水听器探头结构有不同的选择。实际上裸光纤感受的声场变化的灵敏度是很低的,裸光纤的频率响应也是不能直接适应声场探测需求的。无论是标量水听器还是矢量水听器,都需要采用封装技术来解决灵敏度、频率响应及工程可靠性问题,因此光纤光栅水听器探头可以看成是一种结构增敏技术。光纤光栅水听器的探头技术是在充分继承传统光水听器技术的基础上、再考虑光纤光栅自身封装特点进行的创新。

针对光纤光栅探测阵列的应用特点,封装技术研究不仅仅关注对探测灵敏度的提高,还需关注其对光纤光栅水听器阵列的光学系统所提出的高可靠性、小尺寸等基元封装制作要求。目前光纤光栅水听器主要分为标量和矢量两类,标量探头主要探测声压信息,而矢量探头可以探测声压梯度、质点振速、质点加速度、

质点位移等矢量信息。本节将梳理国内外主流光纤光栅水听器标量和矢量探头设计方案,分析其设计思路,为今后水听器探头的设计提供参考。

3.1 标量水听器探头

1) 光栅水听器探头

为了提高单光纤光栅水听器的传感灵敏度,研究人员提出了几种光纤光栅增敏探头。黄俊斌等^[41-42]研究了平面型光纤光栅水听器探头,并提出了一种基于薄壳弹簧的增敏结构。通过增大声压作用面积,并将径向压力转化为FBG的轴向应变,使FBG对声压信号的灵敏度增加了2900倍。Zhang等^[7]提出了一种活塞型水听器探头,如图10(a)所示,水从传感孔流入内部空腔,当声压作用在橡胶隔膜上引起振动时会诱导光纤光栅发生一定程度的轴向应变。李东明等^[20,43]报道了侧向灌注和铍铜片端面增敏两种单光纤光栅水听器探头结构,如图10(b)、10(c)所示。实验结果表明,侧向灌注增敏结构实际效果不够理想,但是铍铜片端面增敏结构在灵敏度及灵敏度频响指标上已经可以满足应用要求。

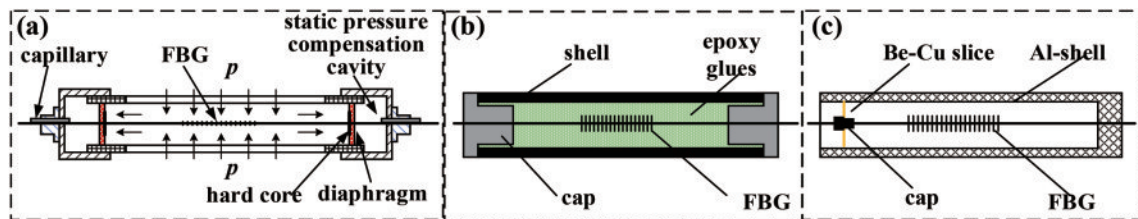


图 10 几种FBG水听器探头结构。(a) 活塞型结构^[7]; (b) 侧向压迫结构^[20]; (c) 端面拉伸增敏结构^[20]

Fig. 10 Several FBG hydrophone probe structures. (a) Piston type^[7]; (b) side pressure type^[20]; (c) end surface stretch sensitization type^[20]

2) F-P干涉型水听器探头

针对FBG-FPI探测阵列的应用特点,封装技术研究不仅仅关注对探测灵敏度的提高,还需关注其对光纤光栅水听器阵列的光学系统所提出的高可靠性、小尺寸等基元封装制作要求。为满足实际应用需要,设计光纤光栅水听器探头时主要是对F-P腔中的光纤进行增敏,还要对光纤光栅进行有效封装保护和屏蔽,以提高工程适用性。

空气腔芯轴型是一种典型的FBG-FPI干涉型光

纤水听器探头,经过多年的探索,这种探头的相关特性研究已经较为完善。2011年,牛嗣亮^[44]和林惠祖^[45]报道了空气腔芯轴型结构的FBG-FPI标量水听器,并在传统结构的基础上提出了差动探测FBG-FPI探头,结构如图11所示^[46]。这种结构中4个FBG均放置在内壳层内壁,两个FBG-FPI的传感臂分别缠绕在空气腔的内壁和外壁,当受到声压影响时内壁外壁受到的影响相同但是声压信号是相反的,因此这种探头结构不仅能够提高灵敏度还能降低噪声干扰。

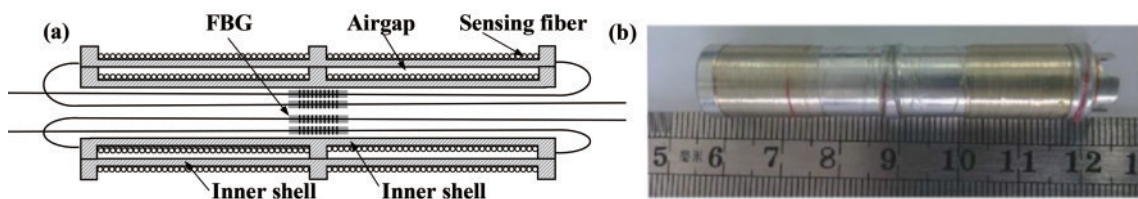


图 11 差动探测FBG-FPI水听器探头^[46]。(a) 示意图; (b) 实物图。

Fig. 11 FBG-FPI hydrophone probe for differential detection^[46]. (a) Schematic diagram; (b) physical map

3.2 矢量水听器探头

矢量水听器按照其所测量的物理量可划分为声压

梯度型、位移型、振速型和加速度型。声压梯度、位移、振速及加速度之间存在着确定的关系,所以知道其中

之一的物理量就可以获得其他的物理量。相对于其他类型,光纤矢量水听器具有更高的灵敏度和更宽的工作频带,而且其结构紧凑,有利于实用化和大规模成阵。易郎宇等^[47]系统归纳了传统的光纤矢量水听器结构类型,主要包括光纤连接质量块式结构、顺便柱体(芯轴型)结构、圆柱薄壳式结构、内部充液式结构、弹性盘式结构和簧片式结构等。而光纤光栅矢量水听器探头不仅能够参考传统的光纤水听器探头结构,由于光纤光栅本身性能还会受到弹性形变影响,因此设计

空间更为广泛。

1) 单光纤光栅矢量探头

自 Tveten 等^[48]提出基于加速度计的光纤矢量水听器以来,光纤矢量水听器得到了快速发展。1996 年,NRL 首次报道了基于 FBG 的光纤加速度计,该团队将 FBG 封装在弹性体中作为探头,如图 12(a)所示^[9]。当探头沿规定的方向加速运动时,里面的质量块会挤压弹性体从而改变 FBG 的长度引起中心波长偏移,再经过干涉仪即可解调出加速度。

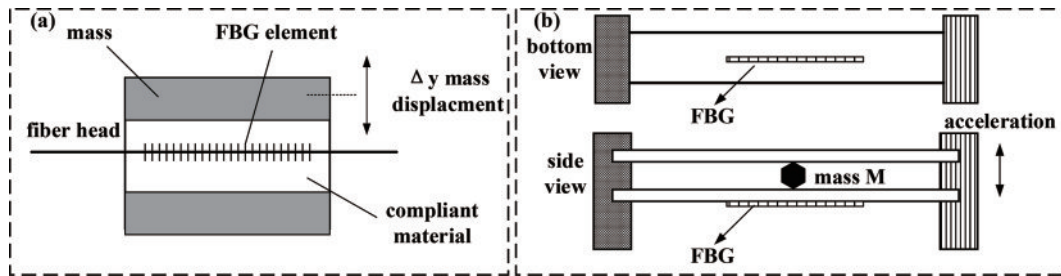


图 12 NRL 报道的 FBG 加速度计示意图^[9]。(a) 弹性体结构;(b) 弹性板梁结构

Fig. 12 Diagram of FBG based accelerometer reported by NRL^[9]. (a) Elastomeric structure; (b) elastic beam structure

1998 年 Todd 等^[49]在原有光纤光栅加速度计的基础上又提出了弹性板梁结构的光纤加速度计,结构如图 12(b)所示。该报道研究了不同质量块的质量对传感性能的影响,实验结果显示,质量的增加能增大整体响应灵敏度但是会降低谐振幅度。Mita 等^[50]提出一

种高灵敏度光纤加速度计结构用于测试建筑损伤检测,探头结构如图 13 所示。此外还有几种基于单个光纤光栅的加速度计,但是这些结构均未进行水下声压信号测试^[51-53]。

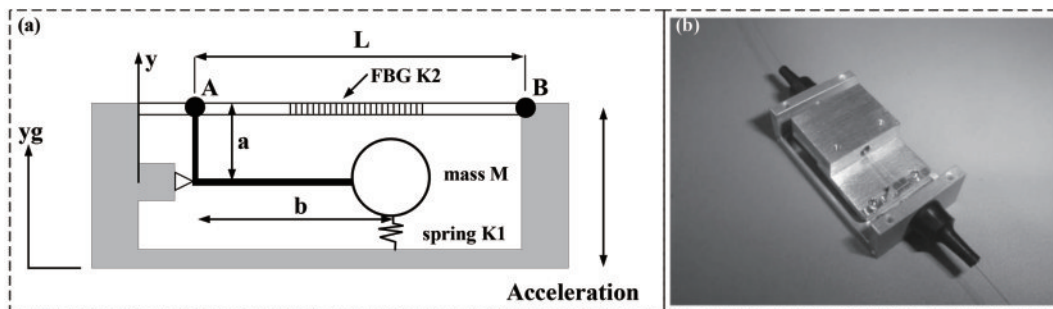


图 13 Mita 等制备的 FBG 加速度计^[49]。(a) 示意图;(b) 实物图

Fig. 13 FBG based accelerometer designed by Mita et al^[49]. (a) Diagram; (b) physical map

2) F-P 干涉型矢量探头

由上文可知,由于 FBG-FPI 腔具备灵敏度高、结构简单、成本低廉、易于复用等特点,特别适合于大范围传感测试。但是基于 FBG-FPI 的干涉型光纤矢量水听器的公开报道较少,目前为止,大规模实际工程化应用的报道仅有 OptoPlan 公司研制的用于海底地震测量的 4C 传感阵列(含 3 个加速度计和 1 个水听器),该传感基元内部光路结构及实物^[32]如图 14 所示。从图中可以看出,该矢量水听器的结构较为简单,X、Y、Z 方向的传感轴各自分立,由于该结构是铺设在海底用于地震测量,因此整体质量较大。

2009 年,秦艳芳^[54]提出了 FBG-FPI 三维矢量水听器的构想,该矢量水听器的探头采用三轴共用质量块

的同振式结构,每个 F-P 腔中均有一个 FBG 嵌入质量块,当加速度作用在探头时,FBG 的参数不发生变化,只有 F-P 腔腔长改变导致的相位变化。2017 年,戴维栋^[55]基于 F-P 腔制备了圆柱薄壳式光纤矢量水听器,并对其一维结构传感性能展开了研究,探头结构如图 15 所示。

杭州应用声学研究所 2018 年也报道了一种用于水声信号探测的基于 FBG-FPI 的分立式光纤矢量水听器,整个矢量水听器装置^[56]如图 16 所示,图中左上角的插图是三轴加速度计,加速度计密封后由支架悬挂,图 16(b)所示为加速度基元的结构示意图。实验结果显示,三个维度方向均显示出较好的一致性,方向性指数在 100 Hz 的频率下均大于 30 dB。

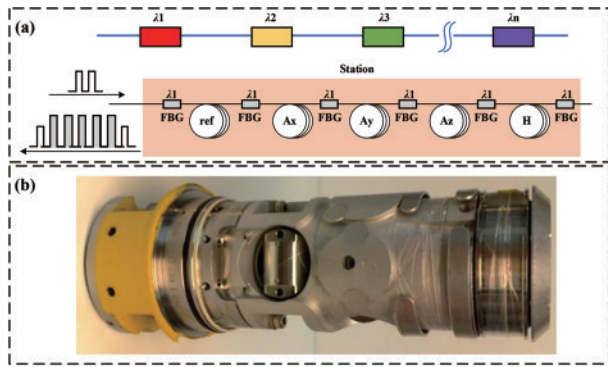


图 14 OptoPlan 研制的矢量传感基站^[32]。(a) 传感基站内部的光纤传感结构;(b) 传感基站组件实物

Fig. 14 Vector sensing base station produced by OptoPlan^[32]. (a) Fiber optic sensor configuration within a sensing base station; (b) physical sensing base station package

3.3 其他传感增敏技术

对于光纤水听器而言,水下湿端结构产生相位变化配合干端信号调制解调在整体上就具备了水声信号

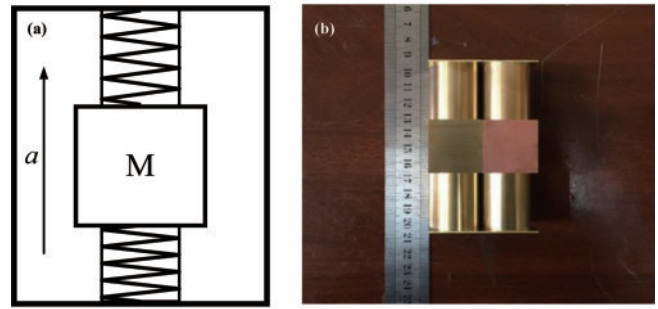


图 15 基于 FBG-FPI 的薄壳式圆柱体结构一维加速度计^[55]。(a) 示意图;(b) 实物图

Fig. 15 FBG-FPI based thin-shell cylinder structure 1-D accelerometer^[55]. (a) Diagram; (b) physical map

探测功能,考虑到实际应用中水下声压量级一般比较小,因此对水下声波的探测需求决定了实际应用中常常需要对传感端进行增敏处理。水听器的探头即可看成是一种结构增敏手段,除此之外还可以进行涂敷增敏、光学增敏以及阵列同步增敏等。

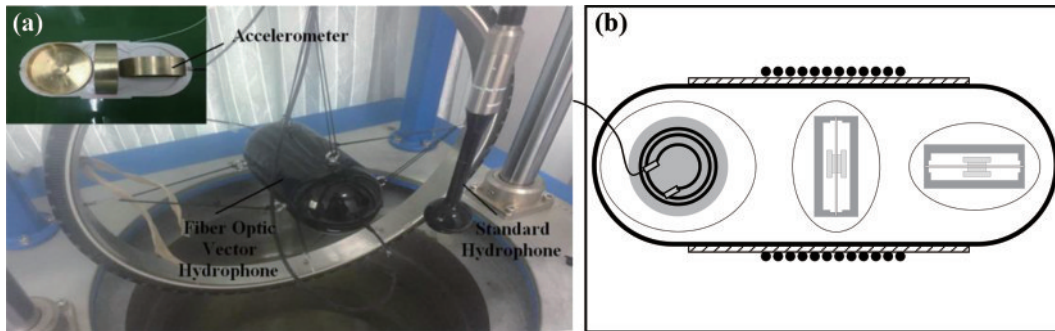


图 16 FBG-FPI 矢量水听器^[56-57]。(a) 加速度计实物图;(b) 示意图

Fig. 16 FBG-FPI based vector hydrophone^[56-57]. (a) Photo of accelerometer; (b) diagram

1) 涂敷增敏

早在 1999 年, NRL 率先研究了光纤涂敷材料对传感灵敏度的影响,该团队对光纤光栅涂敷环氧树脂和聚氨酯材料进行封装,有效增加了光纤光栅水听器的压力灵敏度^[58]。2006 年, Cusano 等^[59]利用杨氏模量较低的聚合物材料研究了不同封装形状对光纤光栅增敏效果的影响,实验结果显示,球形涂敷灵敏度更高而柱形涂敷声压灵敏度较为平坦。2012 年, Moccia 等^[60]实验证明了聚合物不同的涂敷长度和直径对光纤光栅水听器频率相应曲线会产生巨大影响。

对于 FBG-FPI 干涉型光纤光栅水听器而言,其传感部分是两个 FBG 之间的光纤,此时传感部分较长,采用涂敷增敏时需要对整个光缆进行增敏。通常来说,这种涂敷整段传感光纤的增敏方式无论是对于传统基于 MI 的光纤水听器^[61]还是 FBG-FPI 腔水听器来说都是适用的。2017 年, Lavrov 等^[62]在 3 基元匹配干涉型光纤光栅阵列上涂敷 3.5 mm 厚度的聚氨酯材料 (RTV655) 进行增敏,并在开阔水域验证了其实际应用的传感性能,实验系统示意图和测试平台实物图如

图 17 所示。实验结果显示,涂敷材料后光纤水听器灵敏度提升了 20 dB 以上。2019 年,该团队通过隔振设计封装结构有效降低了环境噪声^[63]。涂敷增敏能够有效增加传感器的灵敏度,但是需要结合实际探测需求解决涂敷方式以及各基元一致性问题。

2) 光学增敏

2012 年,牛嗣亮^[44]用宽谱光源探测了 FBG-FPI 腔的传感性能,利用多次反射使相位灵敏度增大 3 倍。2014 年, Wang 等^[64]通过对光纤光栅反射率的设计,利用多次高阶反射增加传输光程来增加匹配干涉仪臂差,以此提升光纤水听器的灵敏度响应,实验结果表明,在 9 次高阶反射干涉情况下灵敏度提高了 19.1 dB。

3) 阵列同步增敏

针对光纤光栅水听器成阵技术和增敏技术不同步的情况, 庞彦东等^[65]研究了一种针对光纤光栅水听器阵列高灵敏度一体化同步增敏技术。该技术从水听器和光纤波导理论模型出发,仿真计算了轴向长度、径向聚合物弹性模量对光纤光栅水听器灵敏度的影响,结合仿真结果,经过复杂工序实现对光纤光栅水听器阵

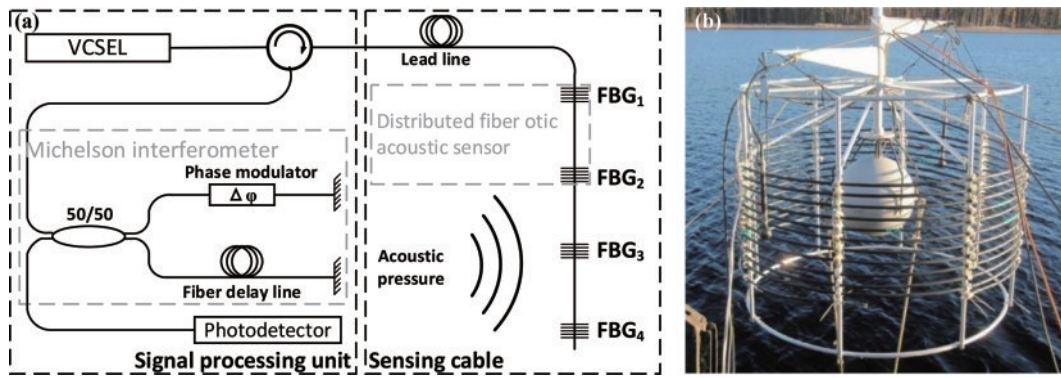


图 17 光纤水下传感器阵列^[62]。(a) 传感系统示意图；(b) 测试平台

Fig. 17 Fiber optic underwater sensor array^[62]. (a) Schematic diagram of sensing system; (b) measurement platform

列的一体化径向涂敷增敏。

4 F-P干涉型光纤水听器关键技术研究

光纤光栅水听器阵列是一个集信号探测、传输和处理于一体的综合光电信息系统。在目前湿端光学结构基本明确的情况下,光纤光栅水听器探头结构增敏和抗加速度设计、光源调制性能和传输性能优化、高速低噪声大容量信号解调等问题是决定光纤光栅水听器是否能够真正走向大规模实际应用的关键所在。

根据国内外的相关研究结果和光纤水听器系统理论、实验及工程研究的经验,光纤光栅水听器的关键技术主要包括:传感增敏、串扰抑制、偏振诱导衰落抑制、相位随机衰落抑制和传输光纤噪声抑制等技术。其中某些技术难点是光纤干涉仪用于传感时所面临的共性问题,因此在研究传统的基于MI的光纤水听器时就已经提出了较为稳定成熟的解决办法。例如在相位随机衰落抑制方面,常用的方法有PGC调制解调和外差调制解调技术两种,这两种信号调制解调技术应用在光纤光栅水听器中抑制相位随机衰落也同样适用。而在某些方面,例如偏振诱导信号衰落,由于传统的基于MI光纤的光纤水听器有法拉第旋镜的加持,因此可以忽略这方面的影响。而光纤光栅水听器水下湿端结构相比传统光纤水听器要简洁很多,水下湿端仅含有在线式光纤光栅,结构简单的同时信号调制解调难度陡然增大,实际应用前还有几个该结构所特有的技术难点亟待攻克。

4.1 时分复用通道串扰抑制技术

相比于传统的基于MI的光纤水听器,由于光纤光栅独特的双向反射特性,时分复用(TDM)串扰的问题更加引人关注。FBG-FPI单路传感系统的串扰为声光脉冲不同级次返回FBG-FPI脉冲之间的干涉信号,其产生结果为放大倍数不同的传感信号。TDM FBG-FPI系统中,由于声光重复频率的影响,同样存在单路传感系统串扰。根据形成串扰的脉冲来源不同,将TDM串扰分为两类:第一类是同一个TDM中一阶反射和高阶反射之间的相干造成的串扰;另一类

是不同TDM周期中脉冲间的串扰。

当光进入F-P腔时,会在干涉仪内多次反射,且包含多种反射情况,对应光在F-P腔中不同的传播路径。将若干个F-P腔串联在一起,由于光在每一个F-P腔中均存在不同情况的多次反射。图18所示为当一对时域上间隔 T 的访问脉冲pulse 1和pulse 2入射系统时,分别经历 $4T$ 和 $3T$ 时间后同时从系统出射所形成的相干信号^[66]。理论上,两个脉冲在各自的传播时间里,历经了多种传播路径,因此,多种不同路径F-P腔的相位信息也包含在最终输出的相干信号中,形成串扰。

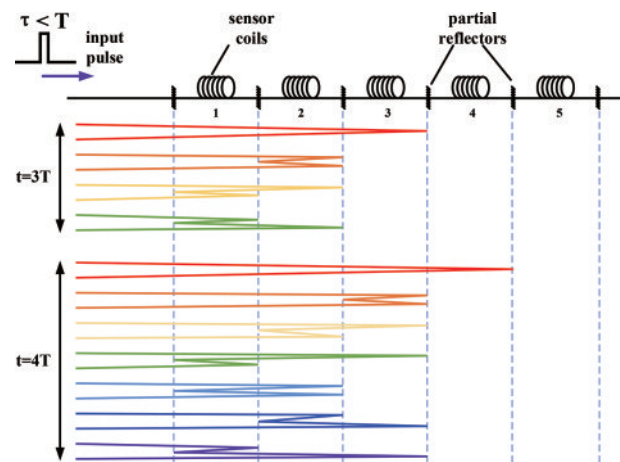


图 18 FBG-FPI传感系统串扰原理图^[66]

Fig. 18 Principle of crosstalk in FBG-FPI based sensing system^[66]

Lu等^[67]总结了目前抑制不同周期TDM串扰的办法主要包括以下四种:低反射率光纤光栅法、宽谱光源法、控制TDM周期法以及复合脉冲外差次载波技术法。

1) 低反射率光纤光栅法

使用低反射率的光纤光栅降低多次反射的不期望的脉冲的光强,进而有效地降低串扰的大小,从而起到抑制串扰的作用。早在1989年,Kersey等^[66]就报道了多次反射在TDM系统中造成串扰的相关研究,并指出降低光纤光栅的反射率可以降低串扰,但是反射率

太低则会导致信噪比下降。2013 年,林惠祖等^[45,68]定量分析了光纤光栅 TDM 系统光栅反射率和复用数量对串扰的影响,为实际应用中光纤光栅阵列向大规模方向发展提供了重要的参考。

2) 宽谱光源法

当不同 TDM 周期的脉冲在 F-P 腔中多次反射时,脉冲之间的光程差会增大,且大于两倍的 F-P 腔长。当光源的相干长度小于两个脉冲的光程差时,不同 TDM 周期的脉冲就不会相干产生串扰。因此选择相干长度较短的宽谱光源可以降低相干串扰^[21-23]。这种方式虽然能够在一定程度上抑制串扰,但是相位噪声较大,对光纤水听器的传感灵敏度有一定影响。

3) 控制 TDM 周期法

通过对 TDM 系统周期进行特定的设计,可以使相邻两组脉冲的反射脉冲串保持合适的间隔,从而使多次反射后的非信号脉冲光强衰减到足够小。TDM 的长度与系统的探测器数量、光纤光栅的反射率以及可接受的串扰大小相关^[69]。这种方法在降低串扰的同时也会降低脉冲的占空比,从而影响采样率。

4) 复合脉冲外差次载波技术法

此方法是一种针对 TDM 系统中多访问脉冲情况下的调制技术,能够在高占空比下抑制串扰^[70]。一个 TDM 周期中,每个时间点的脉冲的相位用一个不同的线性频率调制,这样,当每一个 TDM 周期中有 p 个访问脉冲时,在第 i 个 TDM 周期中时间点 m 处的脉冲受到的相位调制为 $[(i-1)p+m]\Delta\nu$, ($m=0, 1, 2, 3, \dots, p$), 这里 $\Delta\nu$ 被称为次载波频率。当同周期的相邻两个脉冲的一阶反射脉冲相干时,相干信号的相位被次载波频率调制。而在串扰信号中,相干脉冲是由不同 TDM 周期的访问脉冲或者同一个 TDM 周期中不相邻的两个访问脉冲相干而成,因此信号的相位被次载波频率的倍频调制。因此在信号解调的过程中,可以通过滤波的方式消除次载波频率的倍频项,从而消除串扰。

5) 剥层算法

目前抑制相同周期 TDM 串扰的方法主要是利用剥层算法。剥层算法是逆散射算法的一种,因其运算速度快、精度高被广泛应用在光学光栅的重构和传输特性分析上^[71-73]。随着研究的深入,剥层算法被应用在信号处理方面抑制 FBG-FPI 传感系统的 TDM 串扰。

早期 Kersey 等^[66]在利用环形反射器进行 TDM 研究时就指出了多次反射造成的串扰问题,这也为剥层算法抑制 TDM 串扰提供了重要依据。他们还指出,在低反射率情况下 ($<10\%$) 可以忽略反射次数大于 3 次的高阶反射带来的串扰影响。随后 OptoPlan 团队对利用剥层算法解决 FBG-FPI 光纤传感系统中 TDM 串扰^[69]和其他相应的关键技术^[22,74]进行了深入研究。也正是由于这些解调技术的突破,该公司才能实现大

范围工程化应用并在后续商业竞争中处于领先地位^[32]。

4.2 偏振诱导信号衰落抑制技术

偏振诱导信号衰落现象是所有光纤干涉仪都无法避免的问题,其本质是两束光发生干涉时偏振态不一致对干涉结果的影响。由于光纤的双折射效应,两束激光发生干涉时其偏振态对干涉结果可见度的影响更加复杂且具有随机性。除了引起信号衰落,激光偏振态扰动还会在解调信号中引入额外的相位噪声,该噪声被称为偏振衰落诱导相位噪声^[75]。因此偏振态扰动是光纤光栅干涉仪用于传感时的技术瓶颈之一^[23]。由于光纤光栅水听器水下湿端不含特殊元器件仅有光纤光栅,因此解决方案主要依赖光路全保偏设计以及干端调制解调设计,主要包括以下几种方案。

1) 全保偏方案

Okawara 等^[76]使用保偏光纤及保偏光纤光栅组建了双时分通道传感系统,验证了全保偏光纤光栅水听器阵列抗偏振衰落有效性。然而,由于偏振光在经长距离保偏光纤传输后仍会出现偏振串扰耦合问题,因此,该方案目前仅适用于实验室研究,在工程化水听器传感系统中并不适用。

2) 输入偏振控制方案

输入偏振态控制法由 Kersey 等^[77]首先提出,该方法通过主动控制输入光的偏振态,实现两干涉光场偏振态的实时调整,确保干涉条纹可见度始终维持在较高水平。尽管该团队通过实验验证了输入偏振态控制法的有效性,但该方案仅适用于单传感器系统或逐点采样传感系统,其复用能力严重受限,截至目前仍未有该方案实际应用的报道案例。

3) 偏振分集接收技术

偏振分集接收技术最早由 Frigo 等^[78]在 1984 年提出,其基本原理为:干涉仪输出的部分偏振干涉光经空间上互为 60° 的三相检偏器检偏后,由三个独立且参数相当的光电探测器分别捕获并给出光强电压值,使用干涉度最大的一个通道光强电压序列作为解调算法的输入信号序列。典型的采用三偏振分集接收的光纤光栅水听器结构示意图如图 19 所示。

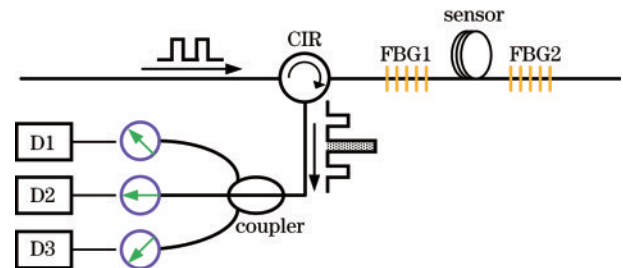


图 19 偏振分集接收的 FBG-FPI 水听器
Fig. 19 Diversity reception of polarization in FBG-FPI based hydrophone

2012年, Okawara等^[76]将偏振分集接收技术应用干涉型光纤光栅水听器, 以解决后者的偏振随机衰落问题。他们设计的水听器系统中, 合计设置了多达6个偏振分集接收通道, 并可以根据干涉度的起伏实时切换最佳解调信号输出通道。然而实验发现, 当受外界应力影响光纤双折射状态发生剧烈变化时, 频繁的偏振通道切换会产生严重的解调相位信号跳变。

近年来, 有多家单位对偏振分集接收技术进行了研究^[71-81], 并均提出将多偏振分集通道的光强经平方和处理后再进行信号解调, 可在牺牲部分干涉度的情况下得到无相位跳变的偏振合成解调相位信号。然而, 从偏振分集接收技术在庞加莱球上的表示来看, 无论设置多少个偏振分集通道或采用何种偏振合成数学处理手段, 由于各光电探测器组成的向量空间并非庞加莱球空间中的最小正交基, 其总是无法完整表征任意干涉光的偏振态。由此, 可判断该方案在物理及数学模型上尚不完备, 仍会受双折射扰动的影响导致部分偏振诱导噪声无法彻底消除。因此, 如何解决传感光路数学模型的完备性, 应是偏振分集接收技术首要解决的基础性问题。

4) 偏振正交询问技术

偏振正交询问技术或称偏振切换技术(PS)最早由 OptoPlan 公司的 Waagaard 等^[74]于 2006 年提出, 并申请专利。该方法的主要原理是: 使用四种不同偏振态组合的询问光脉冲对, 分四次对光纤光栅阵列进行询问, 每种偏振态组合成为一个偏振通道; 而后, 将四个偏振通道的干涉光强进行算法合成。典型的实验系统如图 20 所示。

由于偏振诱导信号衰落现象, 直接求解任意一个偏振通道的相位信号幅度都是不稳定的, 而合成后的解调相位信号可在琼斯矩阵表征的光路模型中被证明

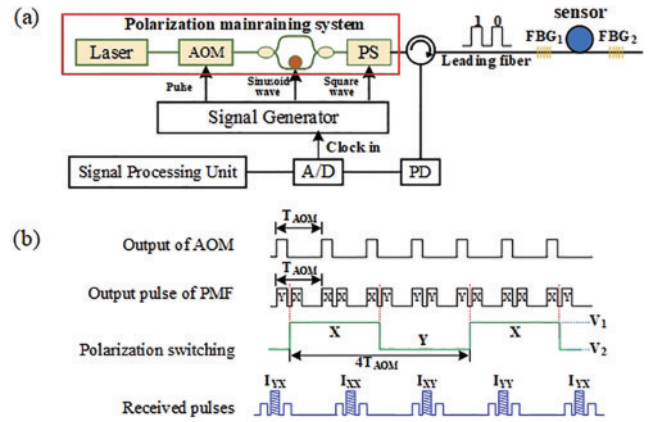


图 20 偏振切换-PCG 混合调制解调技术^[82]。(a) 实验系统示意图; (b) 脉冲时序信号偏振调制
Fig. 20 Polarization switch-PCG hybrid modulation and demodulation technique^[82]. (a) Schematic diagram of experimental system; (b) pulse timing signal polarization modulation

是偏振无关的, 因此可实现偏振信号衰落的抑制, 实验结果如图 21 所示。

偏振正交询问技术能够在保持光纤光栅阵列光路极简的同时, 无须安装工艺难度较高的分集接收光电探测器, 仅通过增设偏振调制器和接收端软件处理算法, 即可实现稳定的、偏振无关的、高干涉可见度的解调相位信号连续输出。因此, 它是目前解决干涉型光纤光栅水听器系统偏振衰落, 并抑制偏振诱导噪声最为理想的选择。2009年, Waagaard等^[83]研究了偏振正交询问技术对传输光纤双折射扰动诱导的噪声信号的抑制能力。结合实验室及海上实测数据, 该方法取得了 36 dB 的抑制效果。2021年, 本文课题组尚凡等^[84]论证了 PGC 调制和偏振正交询问技术结合, 能够同时抑制相位随机衰落和偏振诱导衰落, 进一步推进了光纤光栅关键技术集成应用。

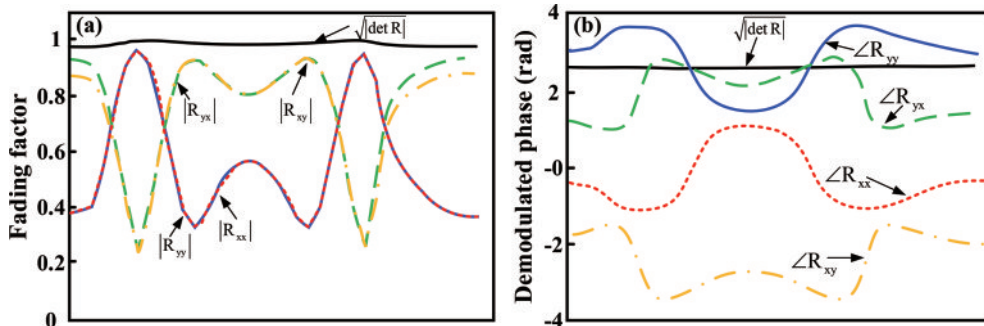


图 21 四个偏振态的解调结果^[74]。(a) 衰减因子; (b) 解调相位
Fig. 21 Demodulation results of four polarization states^[74]. (a) Fading factor; (b) demodulation phase

4.3 传输光纤噪声抑制技术

干涉型光纤光栅水听器系统中, 干端询问设备至光纤光栅水听器阵列之间的光纤称为系统的链路引导光纤或传输光纤。通常而言, 传输光纤经多层护套保

护工艺处理后制成的传输光缆暴露于复杂的海洋环境之中。在水听器系统使用时, 传输光纤在拉伸、弯曲、振动及温度等环境应力的激励下, 其本征长度及双折射参数会发生相应的随机扰动^[83, 85]。同时, 由于系统

光路中部分光纤同时用作询问光脉冲下行与干涉光脉冲上行传输使用,受光纤瑞利散射现象影响,上行干涉脉冲会发生信噪比恶化现象。由此类传输光纤本征光学参数扰动或光纤背向瑞利散射现象引起的传感系统解调噪声可被统称为传输光纤诱导相位噪声或简称传输光纤噪声。

根据传输光纤噪声产生的直接诱因不同,又将其大体分为三类:1) 由于传输光纤双折射随机分布或随机扰动导致的偏振诱导相位噪声,其也可被认为是偏振诱导信号衰落现象导致的解调噪声;2) 由传输光纤本征长度扰动对询问光脉冲相对相位调制作用而引发的多普勒噪声;3) 由传输光纤微观尺度折射率的不均匀性导致的背向瑞利散射噪声。而鉴于干涉型光纤光栅水听器阵列特殊的光学结构,各类型传输光纤噪声之间存在较为复杂的相互耦合关系,因此,针对其传输光纤噪声的抑制手段与措施也与常规方法不尽相同。

1) 传输光纤偏振诱导噪声

光纤干涉仪输入光偏振态的随机分布及扰动不仅会导致干涉可见度随机起伏,即偏振诱导信号衰落现象,而且还会在解调信号中引入额外的相位噪声,该噪声被称为偏振衰落诱导相位噪声^[75]。针对干涉型光纤光栅水听器来说,目前常用的解决方案上文均有所提及。

2) 多普勒相位噪声

当传输光纤在外界应力作用下发生本征长度或有效折射率扰动时,两光脉冲通过传输光纤的时间便存在细微差别,该扰动会通过询问脉冲(或反射脉冲)相对相位的调制作用,向传感系统引入额外噪声信号。由于这类噪声产生的机理与多普勒效应较为相似,因此,被称为传输光纤多普勒相位噪声^[83,86],简称多普勒噪声。若忽略光纤双折射影响,对于共用一个匹配干涉仪、光学位置相邻或安装在同一刚性封装中的传感器时分通道,多普勒噪声应表现为强相干共模相位噪声。Kirkendall等^[27]在光纤拖曳声纳阵研制中发现,由于传输光纤及匹配干涉仪导致的共模干扰噪声可达 60 dB 以上。目前,对多普勒噪声的抑制主要有如下几种方法。

a) 参考干涉法

OptoPlan 公司的 Optowave 系统采用的是参考干涉仪多普勒噪声抑制方法。Optowave 系统中包含上千个矢量光纤光栅传感器基站(sensor station)。在每个矢量传感基站中,合计刻写 6 枚中心反射波长相同且间隔光程相等的低反射率光纤光栅,即实现同一波分通道中包含 5 个时分传感通道,其基本原理框图如图 22 所示。该 5 个时分传感器通道分别设置为参考传感通道、3 个空间正交的加速度传感通道,以及 1 个标量声压传感器通道。图中参考干涉仪的作用是探测传输光纤引入的多普勒噪声,因此可以通过降敏及屏蔽

封装使其对外界物理量不敏感。2009 年 Waagaard 等^[83]研究了参考干涉仪法对传输光纤多普勒噪声的抑制能力,结合偏振正交询问技术,该方法取得了约 22 dB 的噪声抑制效果。

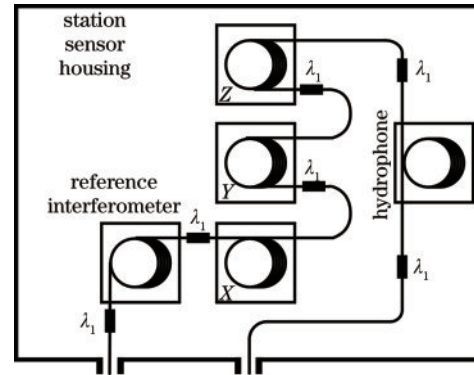


图 22 光纤矢量传感器基站内的光学配置

Fig. 22 Optical configuration within a fiber optic vector sensor station

b) 匹配干涉仪中置法

该方法的基本原理是将匹配干涉仪从干端询问设备直接移动至传感阵列光纤之间,以此大幅缩短询问脉冲对分时通过光纤的长度。需要注意的是该方法需将压电陶瓷也接入光纤光栅阵列之中,传感系统不再是无源系统。

c) 算法抑制

值得注意的是,多普勒噪声和光纤双折射波动互相耦合,因此实际工程应用中抑制多普勒噪声需要考虑双折射扰动^[87]。2021 年,Shang 等^[87]针对相互耦合的传输光纤偏振诱导噪声及多普勒噪声的抑制算法展开研究,以理论模型研究为基础,对抑制算法进行了数值模拟。通过抑制算法的工程化实验表明,该算法能够有效抑制相互耦合的传输光纤偏振诱导噪声及多普勒噪声,这也为实际工程应用中抑制干涉型光纤光栅水听器中的多普勒噪声提供了重要参考。

3) 瑞利散射相位噪声

光波在光纤波导中传播时,入射光会与光纤介质中的微观折射率不均匀区域发生弹性碰撞,从而引起瑞利散射现象^[88]。在干涉型光纤光栅水听器中,伴随传输光纤长度的增加或询问频率的提高,会出现同一询问周期内,无法获取本周期反射光脉冲的情况。此时,向光纤光栅阵列传输的询问脉冲会与前序周期的反射光在传输光纤中相遇一次或多次。相遇点处询问脉冲的后向瑞利散射光与反射光脉冲一起被光电探测器采集。由于瑞利散射光的频率与询问光及反射光相同,这就导致它们之间存在一定的相干性,进而在信号解调中引入相位噪声,该噪声被称为瑞利散射相位噪声。

根据瑞利散射的机理可以推测,在干涉型光纤光栅水听器系统中瑞利散射噪声的强度与传输光纤长

度、光纤材质、脉冲宽度、光源相干长度、系统询问频率等诸多因素有关。由于瑞利散射是光纤波导无法消除的固有属性,因此在大规模、远距离光纤传感阵列中,瑞利散射噪声会是制约系统探测能力提升的主要噪声源^[35,89]。目前,常用的抑制瑞利散射噪声的方法大致有如下三种。

a) 光隔离器单向传输抑制方案

基于光隔离器的单向传输抑制方案最早于 1992 年由 Marrone 等^[90]提出,基本原理是在传感器光路中增设多个光隔离器或环形器以及额外的传输光纤,使得询问光脉冲与反射光不再发生相遇,从而达到抑制传输光纤瑞利散射噪声的目的。尽管该方案能有效抑制瑞利噪声,但要引入额外的光学器件及传输光纤,大大增加了系统成本和复杂程度,与极简光

路结构的设计理念相违背,因而实际应用中报道较少。

b) 主动相干调制抑制方法

2008 年, Rønnekleiv 等^[35]提出主动相干调制法。该方法的基本原理是使用伪随机序列对询问光脉冲进行相位调制,在不减小其波长稳定性的同时,利用伪随机码自相关特性,主动降低询问光脉冲的有效相干长度从而达到抑制瑞利散射噪声的目的。该团队将该方法应用于干涉型光纤光栅水听器系统,在 1.1 km 共模传输光纤、询问频率为 816 kHz 时,获得了约 14 dB 的瑞利散射噪声抑制效果^[35],其系统配置原理如图 23 所示。图中相干调制器(CM)实现了询问脉冲的伪随机码相位调制功能,将原询问脉冲分为 31 份光场片段,每份片段受伪随机序列控制相移调制。

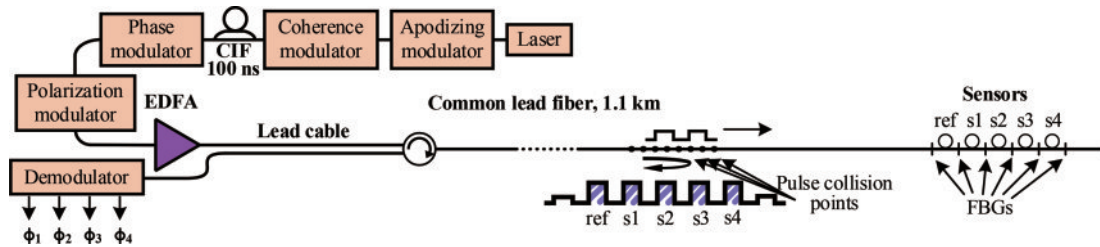


图 23 主动相干调制与频移调制技术原理示意图^[35]

Fig. 23 Schematic diagram of active coherence modulation and frequency shift modulation technology principles^[35]

c) 频移调制抑制方法

在提出相干调制方法的同时, Rønnekleiv 等^[35]还提出了频移调制(FSM)抑制方法。其基本原理是:通过在图 23 中匹配干涉仪之后设置的相位调制器,对每个周期的询问光脉冲实施频率迁移,在相邻周期的询问光场中引入频差信号。以此将相遇点处的瑞利散射噪声迁移至传感系统不关注的较高频区域,最终实现

对瑞利散射噪声的抑制。该方法和主动相干调制一样均需要在干端设备中增设额外的光学器件及相应伺服电路单元,并且只能实现公里级别的瑞利散射噪声抑制。图 24 对比了主动相干调制与频移调制两种方法对瑞利散射噪声抑制效果,从图中可以看出,当两种抑制方法联合使用时,系统本底噪声性能已接近无瑞利散射噪声时的水平。

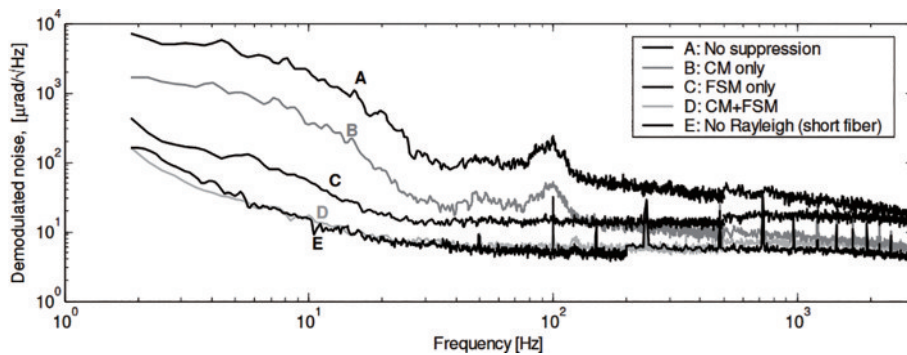


图 24 解调后的噪声频谱^[35]

Fig. 24 Demodulated noise spectra^[35]

5 结 论

基于光纤光栅的光纤水听器是光纤水听器技术的一个重要分支,相比起传统的光纤水听器而言在结构和成本方面均具有更加突出的应用优势,同时由于水下结构更加简单导致系统调制解调的难度更大。本文

围绕国内外对光纤光栅水听器技术的研究和应用,从传感系统、水听器探头类型和关键技术三个方面对光纤光栅水听器技术的研究进展进行了梳理总结。通过前文的分析可知,灵敏度较高的干涉型光纤光栅水听器无疑更适用于水下低频声压探测。挪威的成功案例也表明了基于干涉型光纤光栅水听器阵列的大范围传感

系统具有相当高的可靠性。

虽然干涉型光纤光栅传感系统的结构相对简单且集成度较高,但是解决其信号解调和降噪技术才是将其应用于实际中的关键所在。此外,近年来基于干涉型光纤光栅的矢量水听器技术的巨大应用潜力逐渐成为研究热点,如何同时解决探头灵敏度和信号解调问题是其大范围阵列传感应用的研究重点。随着人们对光纤光栅水听器传感机理研究的日益深入,制备工艺和解调技术将会不断推陈出新,为光纤水听器技术注入新活力的同时也大大推动其应用的快速发展。

参 考 文 献

- [1] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647-649.
- [2] Erdogan T. Fiber grating spectra[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1277-1294.
- [3] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, et al. Fiber grating sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1442-1463.
- [4] 马丽娜. 光纤激光水听器技术[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.
Ma L N. Fiber laser hydrophone[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [5] Takahashi N, Yoshimura K, Takahashi S, et al. Development of an optical fiber hydrophone with fiber Bragg grating[J]. *Ultrasonics*, 2000, 38(1/2/3/4/5/6/7/8): 581-585.
- [6] Rosenthal A, Razansky D, Ntziachristos V. High-sensitivity compact ultrasonic detector based on a pi-phase-shifted fiber Bragg grating[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(10): 1833-1835.
- [7] Zhang W T, Liu Y L, Li F. Fiber Bragg grating hydrophone with high sensitivity[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(9): 631-633.
- [8] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. High-resolution fibre-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection[J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(3): 236-238.
- [9] Berkoff T A, Kersey A D. Experimental demonstration of a fiber Bragg grating accelerometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(12): 1677-1679.
- [10] Weis R S, Bachim B L. Source-noise-induced resolution limits of interferometric fibre Bragg grating sensor demodulation systems[J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12(7): 782-785.
- [11] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. Fiber-optic Bragg grating strain sensor with drift-compensated high-resolution interferometric wavelength-shift detection[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(1): 72-74.
- [12] Cranch G A, Flockhart G M H, Kirkendall C K. Time division multiplexing of fiber Bragg grating sensors using a mode-locked fiber laser source[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5855: 238-241.
- [13] 江毅, 黄俊斌. 基于波分复用器的光纤光栅振动传感器阵列[J]. *中国激光*, 2005, 32(11): 1525-1528.
Jiang Y, Huang J B. Wavelength division multiplex based on fiber optical vibration sensor array[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(11): 1525-1528.
- [14] Cooper D J, Coroy T, Smith P W. Time-division multiplexing of large serial fiber-optic Bragg grating sensor arrays[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(16): 2643-2654.
- [15] Zaidi F, Nannipieri T, Signorini A, et al. High performance time domain FBG dynamic interrogation scheme based on pulse coding[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(5): 460-463.
- [16] Yan L S, Wu Z L, Zhang Z Y, et al. High-speed FBG-based fiber sensor networks for semidistributed strain measurements[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(2): 7200507.
- [17] Wang Y M, Gong J M, Dong B, et al. A large serial time-division multiplexed fiber Bragg grating sensor network[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(17): 2751-2756.
- [18] Luo Z H, Wen H Q, Guo H Y, et al. A time- and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22799-22807.
- [19] Ma L N, Chen Y, Hu Z L, et al. An interferometric phase shift fiber Bragg grating sensing system with greatly reduced background phase noise[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(9): 090601.
- [20] 李东明, 陈军, 葛辉良, 等. 侧面压迫式及端面拉伸式增敏光纤光栅水声传感器[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0506001.
Li D M, Chen J, Ge H L, et al. Water sound sensor using the optical fiber grating sensitivity enhanced through side pressure and end surface pulling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0506001.
- [21] Cranch G A, Flockhart G M H, Kirkendall C K. Efficient fiber Bragg grating and fiber Fabry-Pérot sensor multiplexing scheme using a broadband pulsed mode-locked laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(11): 3798-3807.
- [22] Cranch G A, Flockhart G M H, Kirkendall C K. Efficient large-scale multiplexing of fiber Bragg grating and fiber Fabry-Perot sensors for structural health monitoring applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6179: 61790P.
- [23] Cranch G A, Flockhart G M H, Kirkendall C K. Polarization properties of interferometrically interrogated fiber Bragg grating and tandem-interferometer strain sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(4): 1787-1795.
- [24] Morey W W, Dunphy J R, Meltz G. Multiplexing fiber Bragg grating sensors (invited paper)[J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, 1586: 216-224.
- [25] Morey W W, Dunphy J R, Meltz G. Multiplexing fiber Bragg grating sensors[J]. *Fiber and Integrated Optics*, 1991, 10(4): 351-360.

- [26] Baldwin C S, Yu M, Miller C E, et al. Bragg-grating-based Fabry-Perot sensor system for acoustic measurements [J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3670: 342-351.
- [27] Kirkendall C, Barock T, Tveten A, et al. Fiber optic towed arrays[J]. *NRL Review*, 2007: 121-123.
- [28] Okawara C, Saijyou K. Fiber optic interferometric hydrophone using fiber Bragg grating with time division multiplexing[J]. *Acoustical Science and Technology*, 2007, 28(1): 39-42.
- [29] Okawara C, Saijyou K. Fiber optic interferometric hydrophone using fiber Bragg grating with wavelength division multiplexing[J]. *Acoustical Science and Technology*, 2008, 29(3): 232-234.
- [30] Rønnekleiv E, Waagaard O H, Nakstad H, et al. Ocean bottom seismic sensing system: US7366055[P]. 2008-04-29.
- [31] Nakstad H, Kringlebotn J T. Realisation of a full-scale fibre optic ocean bottom seismic system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7004: 700436.
- [32] Kringlebotn 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.
- [33] Knudsen S, Havsgard G B, Berg A, et al. Permanently installed high-resolution fiber optic 3C/4D seismic sensor systems for in-well imaging and monitoring applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5278: 51-55.
- [34] 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.
- [35] Rønnekleiv 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.
- [36] Guo H Y, Tang J G, Li X F, et al. On-line writing identical and weak fiber Bragg grating arrays[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(3): 030602.
- [37] Wang C, Shang Y, Liu X H, et al. Distributed OTDR-interferometric sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 29038-29046.
- [38] Li Y, Qian L, Zhou C M, et al. Multiple-octave-spanning vibration sensing based on simultaneous vector demodulation of 499 Fizeau interference signals from identical ultra-weak fiber Bragg gratings over 2.5 km[J]. *Sensors*, 2018, 18(1): 210.
- [39] 徐倩楠, 周次明, 范典, 等. 基于斐索干涉的超弱光纤光栅水听器阵列实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(15): 150602.
- Xu Q N, Zhou C M, Fan D, et al. Experimental study on ultra-weak fiber Bragg grating hydrophone arrays based on Fizeau interference[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(15): 150602.
- [40] 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.
- 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.
- [41] 王俊杰, 姜德生, 谢官模, 等. 一种平面型光纤光栅水听器探头技术的研究[J]. *声学学报*, 2007, 32(4): 343-348.
- Wang J J, Jiang D S, Xie G M, et al. Research of the planar optical fiber Bragg grating hydrophone probe[J]. *Acta Acustica*, 2007, 32(4): 343-348.
- [42] 谭波, 黄俊斌, 王建华, 等. 一种 FBG 水听器探头增敏结构的研究[J]. *传感技术学报*, 2007, 20(11): 2417-2420.
- Tan B, Huang J B, Wang J H, et al. A study on a sensitization configuration of FBG hydrophone unit[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 20(11): 2417-2420.
- [43] 李东明, 张自丽, 桑卫兵, 等. 干涉型光纤光栅水听器实验研究[J]. *声学及电子工程*, 2009(1): 1-3, 8.
- Li D M, Zhang Z L, Sang W B, et al. Experimental study on interferometric fiber grating hydrophone[J]. *Acoustics and Electronics Engineering*, 2009(1): 1-3, 8.
- [44] 牛嗣亮. 光纤法布里-珀罗水听器技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
- Niu S L. Research on fiber Fabry-Perot hydrophone[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [45] 林惠祖. 基于匹配干涉的光纤光栅水听器阵列关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013.
- Lin H Z. Study on key technologies of the fiber Bragg grating hydrophone array based on path-match interferometry [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.
- [46] 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.
- [47] 易朗宇, 沈燕青, 徐红霞, 等. 光纤水听器探头结构设计综述[J]. *移动通信*, 2019, 43(5): 51-59.
- Yi L Y, Shen Y Q, Xu H X, et al. Review of optic fiber hydrophones structure designing[J]. *Mobile Communications*, 2019, 43(5): 51-59.
- [48] Tveten A B, Dandridge A, Davis C M, et al. Fibre optic accelerometer[J]. *Electronics Letters*, 1980, 16(22): 854-856.
- [49] Todd M D, Johnson G A, Althouse B A, et al. Flexural beam-based fiber Bragg grating accelerometers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(11): 1605-1607.
- [50] Mita A, Yokoi I. Fiber Bragg grating accelerometer for buildings and civil infrastructures[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4330: 479-486.
- [51] Abushagur O M, Abushagur M A G, Narayanan K. Novel three-axes fiber Bragg grating accelerometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5877: 58770Z.
- [52] Antunes P, Varum H, André P. Uniaxial fiber Bragg

- grating accelerometer system with temperature and cross axis insensitivity[J]. *Measurement*, 2011, 44(1): 55-59.
- [53] Li Y Q, Li K, Liu G Y, et al. A pre-relaxed FBG accelerometer using transverse forces with high sensitivity and improved resonant frequency[J]. *Photonics Letters of Poland*, 2020, 12(1): 4-6.
- [54] 秦艳芳. 基于光纤 F-P 腔矢量水听器的结构设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- Qin Y F. The structure design of fiber-optical F-P vector hydrophone[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [55] 戴维栋. 基于 FBG-FP 腔的光纤矢量水听器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- Dai W D. The research of fiber optic vector hydrophone based on fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [56] 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.
- [57] Jin M Q, Ge H L, Zhang Z L. The optimal design of a 3D column type fiber-optic vector hydrophone[C]//2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA), January 9-11, 2016, Harbin, China. New York: IEEE Press, 2016.
- [58] Hill D J, Nash P J, Jackson D A, et al. Fiber laser hydrophone array[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3860: 55-66.
- [59] Cusano A, Campopiano S, D'Addio S, et al. Optical fiber hydrophone using polymer-coated fiber Bragg grating[C]//Optical Fiber Sensors 2006, October 23-27, 2006, Cancun, Mexico. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2006: ThE85.
- [60] Moccia M, Consales M, Iadicicco A, et al. Resonant hydrophones based on coated fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(15): 2472-2481.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] Vlasov A A, Yu Plotnikov M, Ashirov A N, et al. The method for protection of sensitive fiber optic components from environmental noise and vibration impacts[C]//2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), October 17-18, 2019, St. Petersburg, Russia. New York: IEEE Press, 2019: 305-307.
- [64] Wang W, Hu Z L, Ma M X, et al. Strong fiber Bragg grating based asymmetric Fabry-Perot sensor system with multiple reflections for high sensitivity enhancement [J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(2): 95-99.
- [65] 庞彦东. 基于拉丝塔光栅阵列的超细线光纤水听器关键技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- Pang Y D. Research on key technology for ultrathin fiber-optic hydrophone based on draw tower fiber Bragg grating array[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [66] Kersey A D, Dorsey K L, Dandridge A. Cross talk in a fiber-optic Fabry-Perot sensor array with ring reflectors [J]. *Optics Letters*, 1989, 14(1): 93-95.
- [67] Lu Y, Meng Z. Methods of reducing TDM crosstalk in an inline FBG based Fabry-Perot sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8194: 81942U.
- [68] 王伟. 光纤光栅法布里—珀罗传感系统光学增敏技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2015.
- Wang W. Research on the optical solutions for sensitivity promotion of fiber Bragg grating based Fabry-Perot sensors[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
- [69] Waagaard O H. Method and apparatus for reducing crosstalk interference in an inline Fabry-Perot sensor array: US7019837[P]. 2006-03-28.
- [70] Waagaard O H, Ronnekleiv E. Multi-pulse heterodyne sub-carrier interrogation of interferometric sensors: US7480056[P]. 2009-01-20.
- [71] Rosenthal A, Horowitz M. Inverse scattering algorithm for reconstructing strongly reflecting fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 39(8): 1018-1026.
- [72] 高志鹏, 余震虹, 邢丽华. 一种重构强反射光纤布拉格光栅的新方法[J]. *光学学报*, 2006, 26(7): 991-996.
- Gao Z P, Yu Z H, Xing L H. A novel method for reconstructing strongly reflecting fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(7): 991-996.
- [73] 高志鹏, 余震虹, 邢丽华. 一种用于合成光纤布拉格光栅的全时域算法[J]. *光电子·激光*, 2007, 18(2): 190-193.
- Gao Z P, Yu Z H, Xing L H. A full time-domain algorithm for the synthesis of fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2007, 18(2): 190-193.
- [74] Waagaard O H, Rønnekleiv E. Method and apparatus for providing polarization insensitive signal processing for interferometric sensors: US7359061[P]. 2008-04-15.
- [75] Kersey A D, Marrone M J, Dandridge A. Observation of input-polarization-induced phase noise in interferometric fiber-optic sensors[J]. *Optics Letters*, 1988, 13(10): 847-849.
- [76] Saijyou K, Okawara C, Okuyama T, et al. Fiber Bragg grating hydrophone with polarization-maintaining fiber for mitigation of polarization-induced fading[J]. *Acoustical Science and Technology*, 2012, 33(4): 239-246.
- [77] Kersey A D, Dandridge A, Tveten A B. Elimination of polarization induced signal fading in interferometric fiber sensors using input polarization control[C]//Optical Fiber Sensors 1988, January 27, 1988, New Orleans, Louisiana, United States. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 1988: WCC2.
- [78] Frigo N J, Dandridge A, Tveten A B. Technique for elimination of polarisation fading in fibre interferometers [J]. *Electronics Letters*, 1984, 20(8): 319-320.

- [79] 周效东, 周文. 干涉型光纤传感器及阵列的分集检测消偏振衰落技术的研究[J]. 光学学报, 1998, 18(6): 773-778.
Zhou X D, Zhou W. Research on diversity detection and depolarization fading technology of interferometric fiber optic sensors and arrays[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(6): 773-778.
- [80] 陆旻, 张自丽. 光纤分布式传感器抗偏振衰落技术研究[J]. 声学及电子工程, 2013(4): 6-9.
Lu M, Zhang Z L. Research on anti-polarization fading technology of optical fiber distributed sensor[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2013(4): 6-9.
- [81] 蔡冰涛, 牟志修, 陈小宝. 实时偏振切换的光纤光栅水听器阵列信号解调[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2018(3): 33-37.
Cai B T, Mou Z X, Chen X B. Demodulation based on real-time polarization switching for fiber grating hydrophone array signal[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2018(3): 33-37.
- [82] Jiang P, Ma L N, Hu Z L, et al. Low-crosstalk and polarization-independent inline interferometric fiber sensor array based on fiber Bragg gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(18): 4232-4239.
- [83] 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.
- [84] 尚凡, 戚悦, 马丽娜, 等. 基于光纤光栅的时分复用传感阵列相位噪声研究[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306011.
Shang F, Qi Y, Ma L N, et al. Background phase noise of interferometric TDM sensing array based on fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306011.
- [85] 蔡冰涛, 景翠萍, 舒鹏, 等. 非平衡式光纤水听器拖曳阵列拖缆抖动噪声抑制[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2019(2): 33-36.
Cai B T, Jing C P, Shu P, et al. Cable vibration noise suppression technique for unbalanced fiber optic hydrophone towed array[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2019(2): 33-36.
- [86] Guo Z, Gao K, Zhang W H, et al. Doppler noise in the inline FBG-based interferometric hydrophone array[C]// 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 7-10, 2017, Wuzhen, China. New York: IEEE Press, 2017.
- [87] Shang F, Yu Y, Ma L N, et al. Analysis on leading-fiber-induced Doppler noise in interferometric FBG sensor arrays using polarization switching and PGC hybrid processing method[J]. Optics Express, 2021, 29(11): 16118-16134.
- [88] 刘德明, 孙琪真. 分布式光纤传感技术及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(11): 29-33.
Liu D M, Sun Q Z. Distributed optical fiber sensing technology and its applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(11): 29-33.
- [89] 曹春燕, 熊水东, 胡正良, 等. 光纤水听器 200 km 无中继传输系统噪声研究[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0406006.
Cao C Y, Xiong S D, Hu Z L, et al. Noise analysis of repeaterless long-haul fiber-optic hydrophone systems with the fiber length up to 200 km[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0406006.
- [90] Marrone M J, Kersey A D, Villarruel C A, et al. Elimination of coherent Rayleigh backscatter induced noise in fibre Michelson interferometers[J]. Electronics Letters, 1992, 28(19): 1803-1804.