

湿端结构极简的低噪声低串扰光纤光栅水听器阵列

马丽娜, 尚凡, 戚悦, 卞玉洁, 熊水东*

国防科技大学气象海洋学院, 湖南长沙 410073

摘要 由于湿端极简化, 光纤光栅水听器系统中普遍存在的偏振诱导信号衰落和随机相位衰落等关键问题仅能采用复合型调制解调手段解决; 光纤光栅的双向反射特性会引起传感通道间信号串扰增加等新问题。报道了一种光纤光栅水听器阵列, 水下仅采用 80 个光纤光栅构成 64 基元水听器阵列。采用相位生成载波与偏振切换调制解调方案, 系统本底相位噪声达到 $-95 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}@1 \text{ kHz}$, 等效噪声压为 $36 \text{ dB}@1 \text{ kHz}$ 。系统采用低反射率光纤光栅, 结合 8 空分 \times 2 波分 \times 8 时分复用结构设计, 系统的时分、空分和波分通道串扰均稳定在 -40 dB 以下。该研究为光纤光栅水听器的工程实用化提供了重要的实践探索。

关键词 光纤光学; 光纤水听器; 光纤光栅; 本底相位噪声; 等效噪声压; 通道串扰

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221403

1 引言

随着海洋在国家战略地位上的不断提升, 维护海洋安全、开发海洋、经略海洋的重要性达到前所未有的高度。由于声波是水下唯一能远距离传播的信息载体, 通过声波获取水下信息的水听器成为支撑国家海洋战略的重要装备。在各类水听器中, 光纤光栅水听器兼具光学相位检测的高灵敏度特性和光栅天然良好的复用特性, 具有灵敏度高、动态范围大、易于复用等优势^[1-7]。特别的是, 相较于其他类型光纤水听器, 光纤光栅水听器湿端阵列中仅含有唯一的光纤元器件, 即在线式光纤光栅, 并且可通过在线刻写的方式实现直接组阵^[8-9]。水下分立光学器件及光纤熔接点个数的急剧减少将带来高可靠性、轻量化、小型化等突出的应用优势, 光纤光栅水听器遂成为下一代高集成度大规模水听器设计优选方案^[10-11]。在海洋资源开发领域, 以挪威海底油气田永久监测系统为代表的纤维光栅水听器系统设计规模已经达到惊人的 7000 个以上矢量基元^[12-17], 水下含有至少 40000 个光纤光栅。2010 年挪威 OptoPlan 研究小组布设的系统经过 8 年运行后基元的存活率仍可达 97% 以上^[14]。在水下预警探测领域, 2019 年美国海军实验室 (NRL) 发布的报告中将 TB-33 纤维光栅细线拖曳水听器誉为“最有发展潜力的下一代水听器系统”^[9]。

当前, 国内纤维光栅水听器在基本原理突破的基础上, 正在向工程实用化阶段迈进。2019 年郭振等^[18]报道了外径为 20 mm 的纤维光栅干涉型拖曳水听器阵列, 阵列含有 32 基元。2021 年丁朋等^[19]报道了 4 基元的纤维光栅水听器阵列。

为深入评估纤维光栅水听器面向工程实用化中的关键问题解决情况, 本文报道了一套水下光学结构极简化的低噪声纤维光栅水听器阵列。水下湿端仅含有 80 个纤维光栅, 构成了 64 基元纤维光栅水听器阵列, 其在实现湿端极简化结构优势的情况下依然面临着如下问题: 纤维水听器系统中普遍存在的随机相位衰落^[20-21]、偏振诱导信号衰落^[22-24]等影响微弱水声信号检测性能的关键问题仅能采用干端调制解调技术解决; 纤维光栅的双向反射特性也会导致传感通道间信号串扰增加等新的技术问题^[25]。本文采用相位生成载波与偏振切换 (PGC-PS) 复合调制解调方案, 解决了随机相位衰落和偏振诱导信号衰落等问题, 系统的本底相位噪声达到 $-95 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}@1 \text{ kHz}$, 水听器基元声压灵敏度为 -131 dB , 系统的等效噪声压为 $36 \text{ dB}@1 \text{ kHz}$, 通道串扰很好地控制在 -40 dB 以下。当前, 国外的纤维光栅水听器阵列已进入或即将进入工程化应用阶段。本文研究为国内干涉型纤维光栅水听器的工程实用化提供了重要探索。

收稿日期: 2022-07-01; 修回日期: 2022-09-19; 录用日期: 2022-09-29; 网络首发日期: 2022-10-09

基金项目: 国家自然科学基金 (61901488)

通信作者: *xiong_shui_dong@nudt.edu.cn

2 系统构成

2.1 湿端光学结构与统一化干涉光场模型

干涉型光纤光栅水听器水下基础基元由一对反射特性相同的光纤布拉格光栅及其之间的传感光纤构成。若采用一对激光脉冲对该基元光路进行询问,如图 1 所示,当满足激光脉冲中心波长与光栅的反射中心相同以及脉冲对的时间间隔与光在两光栅之间光纤

中往返传输一次的时延相同这两个条件时,由第一个光栅反射回来的尾脉冲会与第二个光栅反射回来的首脉冲在时间上完全重合并发生干涉,且干涉结果由两光纤光栅间光纤的相位决定。通过对干涉光强进行检测,可获取两个光栅之间的光纤相位信息。当有声压信号作用在两个光栅之间的光纤上时,可实现对水下声信息的获取。

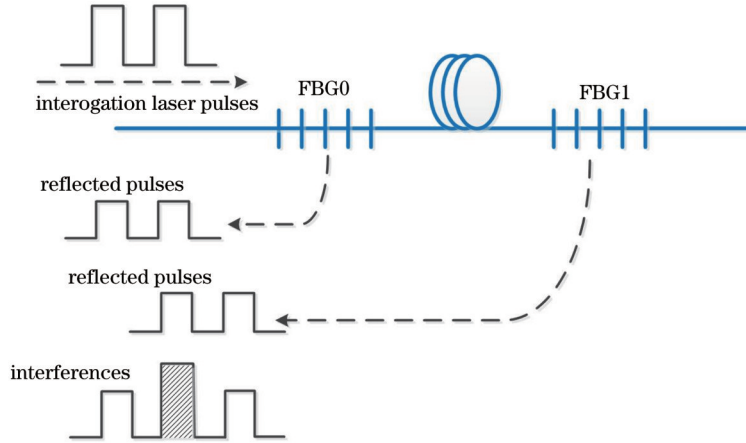


图 1 干涉型光纤光栅水听器基础基元结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of base structure of interferometric FBG hydrophone

由于光纤光栅具有在线式透射与反射一体化特征,以及其天然具备的良好波分性能,在一根光纤上刻写多个光纤光栅即可形成水听器阵列。图 2 是光纤光栅水听器阵列时分(TDM)波分(WDM)混合复用原理结构图。由于时分波分混合复用结构共用同一根光纤,因此称这类复用结构为光纤光栅水听器阵列的最小共模结构。对于 m 路 TDM 和 n 路 WDM (m TDM \times

n WDM) 的复用结构,阵列中共含有 n 组工作在不同波长的时分复用结构,每组时分复用结构内含有 $m + 1$ 个波长相同的光纤光栅,每相邻两个同波长的光栅与其之间的光纤构成一个如图 1 所述的水听器基元。水听器基元编号命名为 $S_1, S_2, \dots, S_m, \dots, S_{[(n-1) \times m] + 1}, S_{[(n-1) \times m] + 2}, \dots, S_{n \times m}$ 。

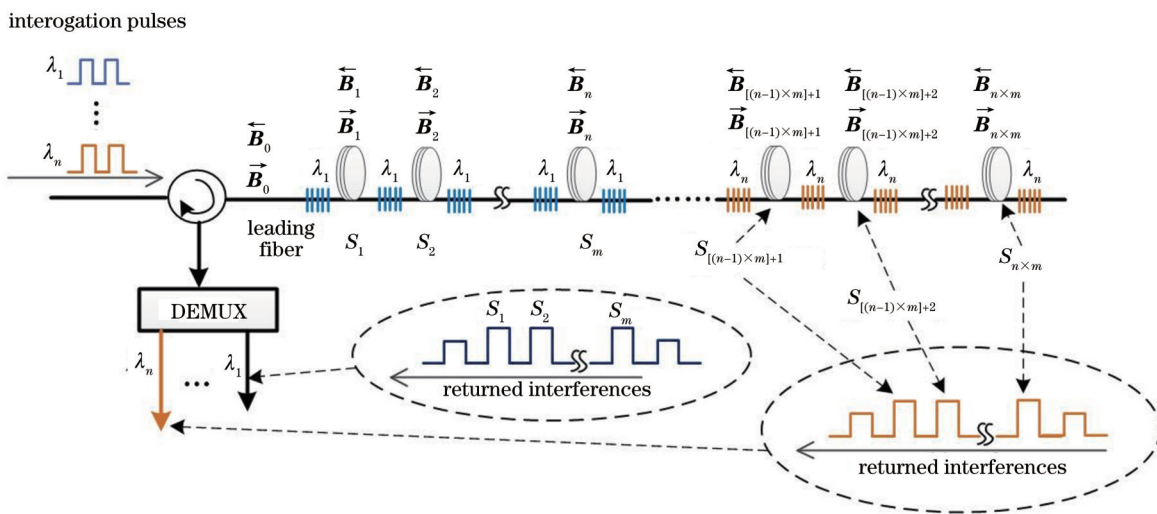


图 2 干涉型光纤光栅水听器最小共模结构示意图

Fig. 2 Minimum common-mode structure of interferometric FBG hydrophone

光纤光栅水听器阵列湿端的总体结构可在最小共模结构基础上结合空分复用(SDM)技术构成,如图 3

所示。图 3 中共有 8 个空分复用结构,每个空分复用结构为一个 4TDM \times 2WDM 的最小共模结构,合计含有

10 个光栅。其中前 5 个光栅的反射谱相同,中心布拉格波长为 1539.77 nm(CH47),且呈等间距分布,构成 1 组 4 重时分复用结构;后 5 个光栅的反射谱相同,中心布拉格波长为 1533.47 nm(CH55),光栅等间距分布,构成第 2 组 4 重时分复用结构。两组时分复用结构

除工作波长不同,其余参数完全相同,两组时分复用结构之间构成两重波分复用。综上,该阵列采用 4TDM×2WDM×8SDM 结构设计,合计含有 64 个干涉型光纤光栅水听器基元。

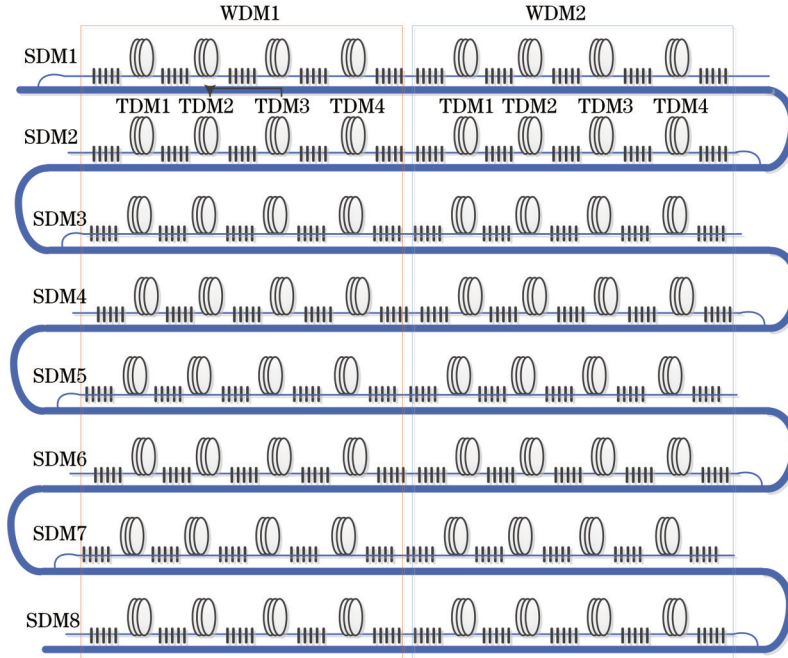


图 3 干涉型光纤光栅水听器混合复用结构示意图

Fig. 3 Diagram of interferometric FBG hydrophone multiplexed structure

无论对于图 1 所示的基础基元、图 2 所示的最小共模结构还是图 3 所示的混合复用结构,水听器基元干涉均可由一组时分复用结构的统一化干涉模型描述。

为方便分析,首先以工作在 CH47 波长上的第一组时分复用结构阵列为例进行分析。设传输链路光纤的下行传输琼斯矩阵为 \vec{B} ,上行传输矩阵为 $\vec{\tilde{B}}$ 。则每个传感基元中传感光纤的下行传输琼斯矩阵可表示为 $\vec{B}_l = \exp(-j\varphi_l)\vec{U}_l (l=0, 1, 2, \dots, m)$,上行传输琼斯矩阵为 $\vec{\tilde{B}}_l = \exp(-j\varphi_l)\vec{\tilde{U}}_l (l=0, 1, 2, \dots, m)$ ^[26-27],下标 0 表示进入水听器阵列之前的传输光纤, φ_l 为光纤中的相位延迟,其中水听器基元内的光纤相位延迟信息中携带有水声信号, \vec{U}_l 和 $\vec{\tilde{U}}_l$ 为光纤双折射矩阵,其由光纤双折射状态决定,且为酉正矩阵^[26-27]。工作在同一波长上的时分复用阵列中 5 个光栅反射谱相同,且其

反射矩阵记为 r ,两入射光脉冲琼斯向量分别为 E_{in0} 和 E_{in1} ,则对于阵列中任意一组构成时分复用结构的 4 个基元,发生干涉的两束光可表示为

$$\begin{cases} E_{r1} = \vec{B}_0 r \rho_0 \vec{B}_0 E_{in1} \\ E_{s1} = t_0^2 \vec{B}_0 \vec{\tilde{B}}_1 r \rho_1 \vec{\tilde{B}}_1 \vec{B}_0 E_{in0} \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} E_{ri} = \prod_{k=0}^{i-2} t_k^2 \prod_{k=0}^{i-1} \vec{B}_k r \rho_{i-1} \prod_{k=i-1}^0 \vec{B}_k E_{in1} \\ E_{si} = \prod_{k=0}^{i-1} t_k^2 \prod_{k=0}^i \vec{B}_k r \rho_i \prod_{k=i}^0 \vec{B}_k E_{in0} \end{cases}, \quad i = 2, 3, 4, \quad (2)$$

式中: t_k 为第 $k+1$ 个光栅的振幅透过率; ρ_i 为第 i 个光栅的振幅反射率。

由式(1)和式(2)可知,一组时分复用结构中第 i 个传感基元的干涉光强可表示为

$$\begin{cases} I_1 = (E_{s1} + E_{r1})^\dagger (E_{s1} + E_{r1}) = I_{1,DC} + 2\rho_0\rho_1 t_0^2 \operatorname{Re} \left[E_{in1}^\dagger (\vec{B}_0)^\dagger (\vec{\tilde{B}}_1)^\top \vec{B}_1 \vec{B}_0 E_{in0} \right] \\ I_i = (E_{si} + E_{ri})^\dagger (E_{si} + E_{ri}) = I_{i,DC} + 2\rho_{i-1}\rho_i t_{i-1}^2 \left(\prod_{i=0}^{i-2} t_i^4 \right) \operatorname{Re} \left\{ E_{in1}^\dagger \left[\prod_{i=0}^{i-1} (\vec{B}_i)^\dagger \right] (\vec{\tilde{B}}_i)^\top \vec{B}_i \left(\prod_{i=i-1}^0 \vec{B}_i \right) E_{in0} \right\}, \quad i = 2, 3, 4 \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $I_{i,DC}$ 表示干涉光强中的直流分量; $(\vec{\tilde{B}}_i)^\top = r \vec{B}_i r$ 且为酉正矩阵,即 $(\vec{\tilde{B}}_i)^\dagger \vec{B}_i = (\vec{B}_i)^\top (\vec{\tilde{B}}_i)^* = I, I$ 为单位

阵^[28-29], 上标 \dagger 代表转置复共轭运算符, 上标 $*$ 代表复共轭运算符。

对于工作在另外一个波长上 CH55 的时分复用阵列, 式(3)中对应的反射率和透射率为 CH55 波长所对应的数值。特别地, 由于处于阵列中的位置不同, \vec{B}_0 也不同。布拉格波长为 CH55 的第一个光栅之前的所有光纤, 含真正的传输光纤及工作在 CH47 上的时分复用结构阵列, 都将计入 \vec{B}_0 之中。

再进一步, 将式(3)扩展到不同的空分复用结构中, 除 \vec{B}_0 所对应的实际光纤会发生改变外, 式(3)依然可用于表达所有基元的干涉结果。

2.2 干端调制解调系统与关键参数设计

由于干涉结果[式(3)]可知, 对于任意一个编号为 n 的光纤光栅水听器基元, 其传感相位信息包含于矩阵 $(\vec{B}_n)^T \vec{B}_n$ 中, 同时该项与本基元之前的所有光纤段 $\vec{U}_s (s=0, 1, 2, \dots, n)$ 相互耦合。由于 \vec{U}_s 与光纤的双折射状态密切相关^[30], 因此任一基元内光纤及基元前序所有光纤的双折射扰动都将影响干涉光强变化, 即产生偏振诱导信号衰落现象。除此之外, 基元本身工作点位置变化导致的随机相位衰落现象^[30]也同样存在

于光纤光栅水听器系统中。对于光纤光栅水听器阵列的低噪声解调, 需要首先解决偏振诱导信号衰落和随机相位衰落这两个基础问题。

为实现光纤光栅水听器阵列稳定的低噪声相位解调, 本文设计了基于 PGC-PS 的双波长干端调制解调系统, 如图 4 所示。波长分别为 CH47 和 CH55 的两窄线宽激光器输出光通过波分复用器合成一束后输入至声光调制器, 被调制为脉冲激光。再进一步通过光路补偿干涉仪(CIF), 生成两个在时间上错开的脉冲对。CIF 两臂的光程差恰为湿端基元相邻光栅之间光纤的 2 倍, 故 CIF 输出双脉冲间隔与光在相邻光栅间往返一次的时间延迟相同, 实现匹配干涉。选取 CIF 某一臂中部分光纤缠绕在压电陶瓷(PZT)上, 用于引入相位载波(PGC)调制信号。同时, 为实现偏振诱导信号衰落现象的有效抑制, 在 CIF 后增设偏振切换器(PS), 实现对两个光脉冲偏振状态的单独调制。完成所有调制后的脉冲对通过耦合器分成 8 束, 再分别通过光纤环形器注入至光纤光栅水听器阵列湿端的各个空分复用结构中。每个空分结构返回的干涉光脉冲序列通过解复用器(DEMUX), DEMUX 将工作在两个波长上的时分复用干涉脉冲序列分开, 再进行光电转换与采集解调。

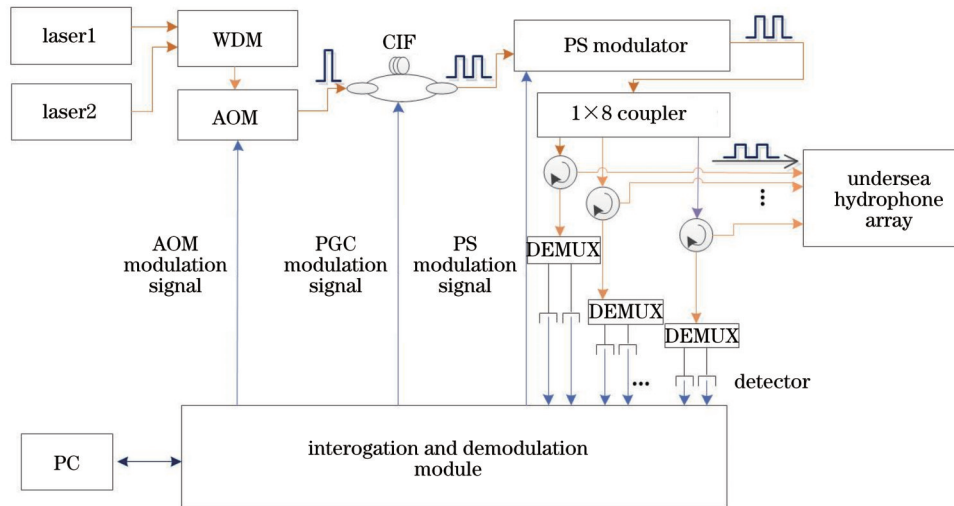


图 4 干涉型光纤光栅水听器调制解调结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of modulation and demodulation structures of interferometric fiber Bragg grating hydrophone

图 4 所示的调制解调系统中混合使用了 PGC 调制解调与偏振切换方案, 故也称为 PGC-PS 调制解调方案, 方案的原理在团队前期工作中已进行详细描述^[11,25], 本文不再赘述。声光调制器(AOM)的调制频率 $f_{AOM}=400$ kHz, PGC 调制信号频率 $f_{PGC}=12.5$ kHz, 偏振切换器的调制频率 $f_{PS}=80$ kHz。

3 系统性能

3.1 声压灵敏度

声压灵敏度是水听器的基础指标之一, 其数值主

要取决于光纤光栅水听器基元中的传感光纤长度和封装结构。采用芯轴型空气腔结构对光纤光栅水听器基元进行了封装, 封装后的水听器基元实物图如图 5(a) 所示, 尺寸为 $\phi 18$ mm \times 50 mm。芯轴型骨架材质为铝。成阵后的水听器基元如图 5(b) 所示, 外径为 32 mm。

对成阵后的光纤光栅水听器阵列进行了声压灵敏度测试。测试采用比较法, 即采用一支标准压电水听器作为比较基准, 在驻波声压罐中将标准压电水听器与光纤光栅水听器声中心置于同一高度处, 在施加同

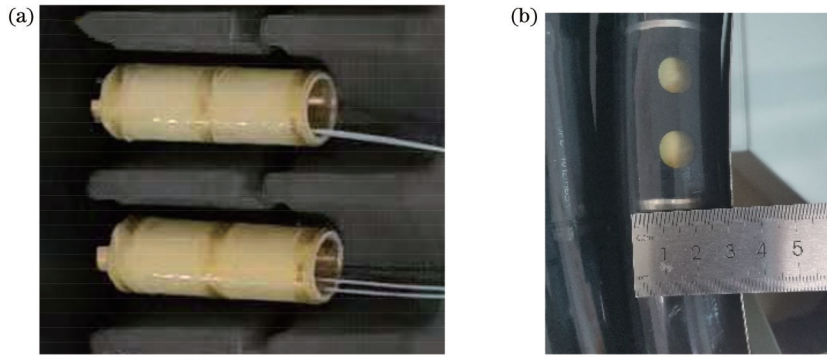


图5 光纤光栅水听器基元实物图。(a)成阵前的基元封装结构;(b)成阵后的基元

Fig. 5 FBG hydrophone primitive physical images. (a) Primitive encapsulation structure before formation; (b) primitive structure after formation

一声信号时将两者的输出进行比对,计算得到光纤光栅水听器基元声压灵敏度。图6所示为第8个空分结构中第1个水听器基元(编号为8-1)的声压灵敏度测试结果。在20~2000 Hz频段范围内,声压灵敏度的测量结果为 (-131.15 ± 1.15) dB ($0 \text{ dB} = 1 \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$)。64支光纤光栅水听器基元在组成阵列后,在测试频段内的最大平均声压灵敏度为 -130.8 dB,最小平均声压灵敏度为 -131.6 dB,在20~2000 Hz频段范围内频率响应起伏均小于 ± 1.5 dB。

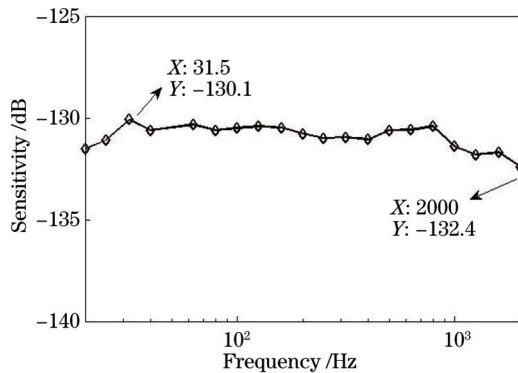


图6 8-1光纤光栅水听器基元声压灵敏度测试结果

Fig. 6 Measured results of acoustic pressure sensitivity of 8-1 fiber Bragg grating hydrophone

3.2 本底相位噪声

本底相位噪声决定了水听器系统的最小可检测声信号强度,同时也是系统调制解调方案和偏振诱导信号衰落抑制方案是否有效的评判依据。在经声屏蔽的较安静的实验室测试环境下,不主动在64基元光纤光栅水听器阵列上施加任何信号,采集并解调系统的本底相位。第1空分通道8个水听器基元(编号1-1~1-8)的本底相位噪声测试结果如图7所示。由图7可知,该空分通道8个基元的本底相位噪声性能基本一致,最大值为 $-96.55 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}} @1 \text{ kHz}$,最低值为 $-98.81 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}} @1 \text{ kHz}$,且无明显线谱噪声存在。其余7个空分通道的本底相位噪声与第1空分通

道类似。总体来看,在实验室不进行特殊环境屏蔽的情况下,64个水听器通道本底相位噪声的最大值不超过 $-95 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}} @1 \text{ kHz}$,对应于 -131 dB 的声压灵敏度,阵列中所有水听器通道的等效声压级不超过 $36 \text{ dB}@1 \text{ kHz}$ 。

3.3 光学通道串扰

鉴于光纤光栅的双向反射特性及最小共模结构的存在,当在阵列中某一个水听器基元上施加信号时,会出现询问光的多次反射导致在没有施加信号的基元通道中解调到信号的现象。将该解调信号与施加信号的基元解调数值之比称为光学通道串扰,一般取对数值,单位为dB。由于本文研制的64基元光纤光栅水听器阵列系统光学结构设计中采用了空分、波分和时分3种复用结构,各种复用结构中的光传输特性完全不同,因此对3种不同的光学通道串扰进行了单独测试实验。

首先测试空分通道的光学通道串扰。在第8个空分通道中的第1个基元(编号8-1)施加1 kHz的声信号,采集第1~7空分通道所有基元的输出结果,并读取在1 kHz上的响应幅值。图8(a)为8-1基元上的响应幅度值,在1 kHz频点上声信号幅度为 $-38 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}} @1 \text{ kHz}$;图8(b)为第7空分通道中第8个基元的响应幅度值(编号7-8),在1 kHz频点上声信号幅度淹没在本底相位噪声中,即低于 $-90 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}} @1 \text{ kHz}$ 。对比可得空分通道的光学串扰为 -52 dB 。

按照同样的分析方法,可得到阵列1~7空分通道所有基元的光学串扰情况。考虑串扰测量的不稳定性,对180次测量结果的概率分布进行统计,得到空分通道光学串扰测试结果。图9所示为第7空分通道所有基元的空分复用串扰测试结果,可以看出,空分复用光学串扰小于 -40 dB 的概率均达到100%。其他空分通道的串扰测试结果与图9所示相当,不再赘述。

测试波分通道的光学通道串扰。在任意空分通道上,在第1个工作波长的第1个基元上施加1 kHz的声

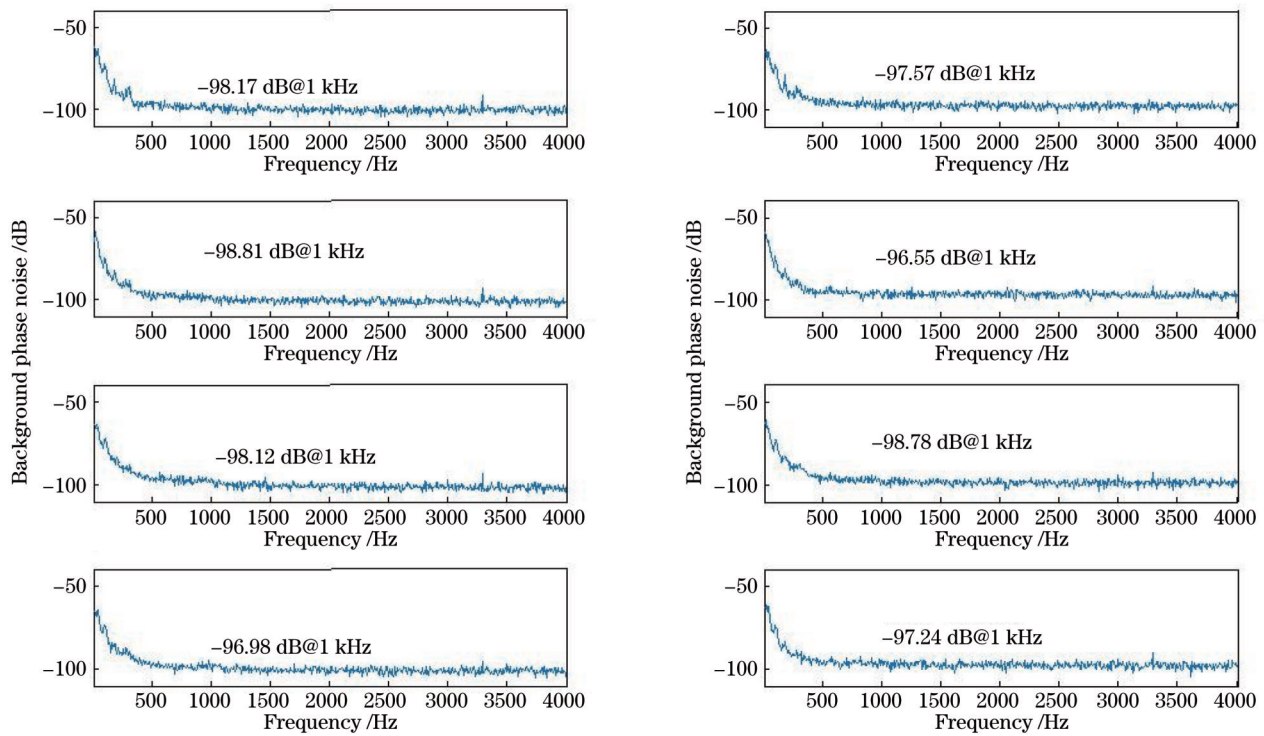


图 7 1-1~1-8 光纤光栅水听器基元本底相位噪声测试结果

Fig. 7 Test results of background phase noise of 1-1-1-8 fiber Bragg grating hydrophones

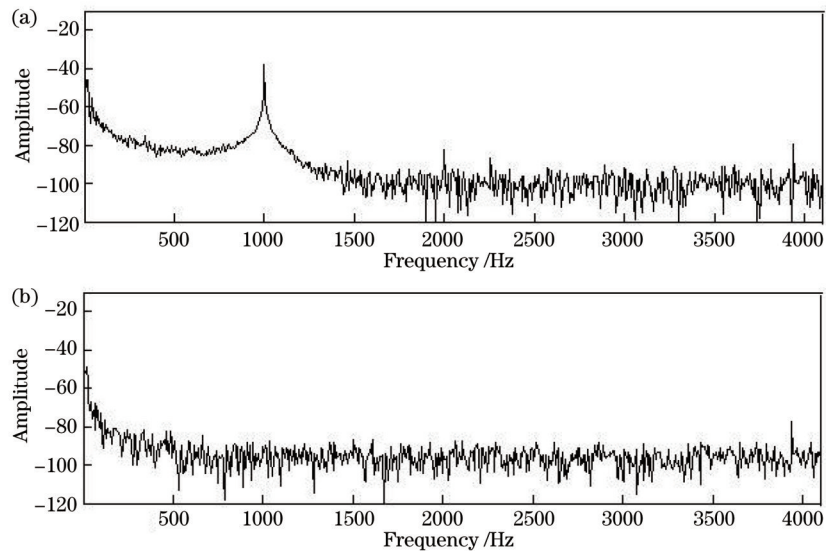


图 8 响应信号解调结果。(a) 8-1; (b) 7-8

Fig. 8 Response signal demodulation results. (a) 8-1; (b) 7-8

信号,采集第 1 个和第 5 个基元的响应结果。将第 5 个基元的解调信号幅度与第 1 个基元信号幅度进行比较并取对数值,即得到 CH47~CH55 的波分复用通道光学串扰。在第 2 个工作波长的第 1 个基元上施加 1 kHz 的声信号,采集第 1 个和第 5 个基元的响应结果。将第 1 个基元的信号幅度与第 5 个基元的信号幅度进行比较并取对数值,即得到 CH55 到 CH47 的波分复用通道光学串扰。同时,考虑串扰测量的不稳定性,对 180 次测量结果的概率分布进行统计,图 10 为第 1

空分通道波分串扰测试结果,由图 10 可知,双向的波分复用光学串扰小于 -40 dB 的概率均高于 95%。其他所有空分通道的串扰测试结果与图 10 所示的指标相同。

最后测试时分复用通道的光学串扰。在任意空分通道上,在第 1 个工作波长的第 1 个基元上施加 1 kHz 的声信号,采集 1~4 个基元的响应结果,将第 2~4 个基元的解调信号幅度与第 1 个基元信号进行比对并取对数值,即在 CH47 波长上的时分复用通道串扰;类似

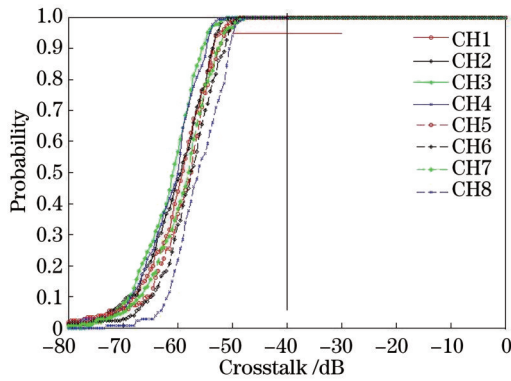


图9 第7空分复用(SDM)通道所有基元的SDM串扰测试结果

Fig. 9 SDM crosstalk of 7th SDM channel

地,在第2个工作波长上的第1个基元(空分第5个基元)施加1 kHz的声信号,采集5~8个基元的响应结果,将第6~8个基元解调信号的幅度与第5个基元信号进

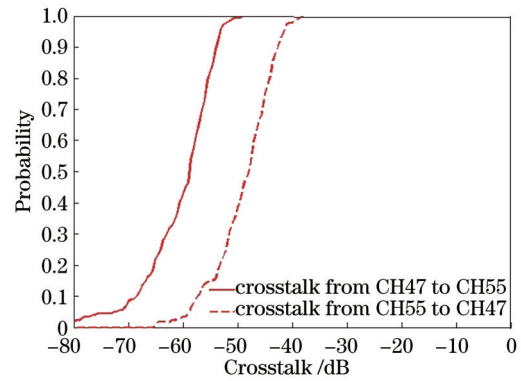


图10 第1空分通道的波分复用串扰测试结果

Fig. 10 WDM crosstalk of 1st SDM channel

行比对并取对数值,即在CH55波长上的时分复用通道串扰。对180次测量结果的概率分布进行统计,图11为第1空分通道的时分通道串扰测试结果。对于两个波长,时分复用串扰小于-40 dB的概率都高于95%。

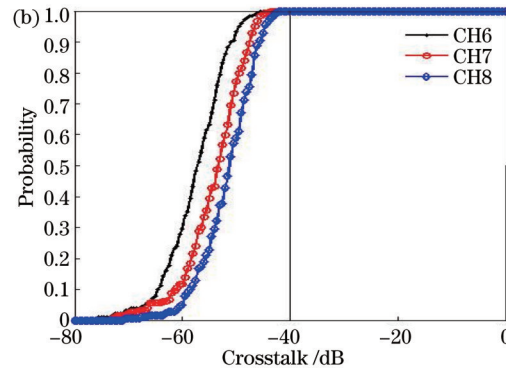
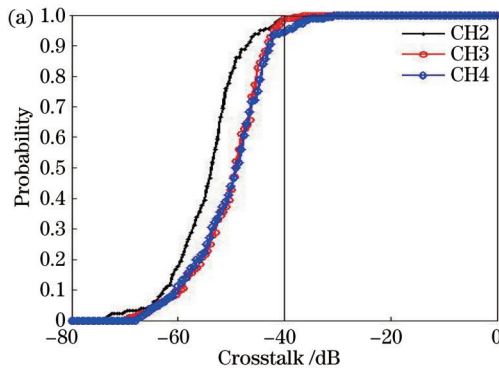


图11 第1空分通道的波分复用串扰测试结果。(a) WDM1;(b) WDM2

Fig. 11 TDM crosstalk of 1st SDM channel. (a) WDM1; (b) WDM2

4 结 论

提出了湿端极简结构的光纤光栅水听器,以水下仅含光栅的设计方式,通过在光学设计、调制解调设计等关键技术上的突破,使其基础探测性能指标满足实际工程应用要求。所提光纤光栅水听器具备了向大规模工程化应用转化的完备技术基础,为干涉型光纤光栅水听器的工程实用化提供了重要探索依据。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Ma L N, Yu Y, Wang J, et al. Analysis on real-time phase delay in an interferometric FBG sensor array using polarization switching and the PGC hybrid processing method[J]. Optics Express, 2020, 28(15): 21903-21915.
- [3] 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.
- [4] 孟洲,陈伟,王建飞,等. 光纤水听器技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306009.

- Meng Z, Chen W, Wang J F, et al. Research progress of fiber optic hydrophone technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306009.
- [5] Kirkendall C, Barock T, Tveten A, et al. Fiber optic towed arrays[EB/OL]. [2022-03-06]. https://www.researchgate.net/publication/235130885_Fiber_Optic_Towed_Arrays.
- [6] 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.
- [7] Jiang P, Ma L, Hu Z, et al. An 8-TDM inline fiber Fabry-Perot sensor array based on ultra-weak fiber Bragg gratings[C]//Asia Communications and Photonics Conference (ACP), Sept.9-11, 2015, HongKong, China. New York: IEEE, 2015: AM1D.4
- [8] 杨威. 大规模弱光纤光栅阵列在线制备质量监测系统研究与实现[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- Yang W. Research and implementation of on-line quality monitoring system for large-scale weak fiber Bragg grating array [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [9] 丁朋, 吴晶, 康德, 等. 采用弱反射光纤布拉格光栅的声波方向检测[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0506002.
- Ding P, Wu J, Kang D, et al. Detection of acoustic wave direction using weak-reflection fiber Bragg gratings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0506002.
- [10] Dandridge A. Fiber optic interferometric sensors at sea[J]. Optics and Photonics News, 2019, 30(6): 34-41.
- [11] 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.
- [12] GrummanNorthrop. Northrop Grumman delivers first block IV Light Weight Wide Aperture Array (LWWAA) submarine shipset[EB/OL]. (2016-11-28) [2022-03-06]. <https://news.northropgrumman.com/news/releases/northrop-grumman-delivers-first-block-iv-light-weight-wide-aperture-array-lwwaa-submarine-shipset>.
- [13] ConocoPhillips. Ekofisk-the discovery that transformed[EB/OL]. (2019-12-20) [2022-03-06]. <https://www.conocophillips.com/>.
- [14] Equinor expands North Sea Sverdrup monitoring system[EB/OL]. (2018-10-02) [2022-03-06]. <https://www.offshore-mag.com/field-development/article/16803585/equinor-expands-north-sea-sverdrup-monitoring-system>.
- [15] ExproGeo. Monitoring of the Ekofisk Field[EB/OL]. [2022-03-06]. <https://www.geoexpro.com/articles/2010/03/monitoring-of-the-ekofisk-field>.
- [16] ASN Delivers First Phase of Jahan Sverdrup PRM Project[EB/OL]. (2019-11-11) [2022-03-06]. <https://www.offshore-energy.biz/asn-delivers-first-phase-of-jahan-sverdrup-prm-project/>.
- [17] Submarine Telecoms Forum. Alcatel submarine networks announces the completion of the Johan Sverdrup PRM System (Phase 1) [EB/OL]. (2019-11-07) [2022-03-06]. <https://subtelforum.com/asn-completes-the-johan-sverdrup-prm-system/>.
- [18] 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.
- [19] 丁朋, 黄俊斌, 庞彦东, 等. 弱反射光纤光栅水听器拖曳阵列[J]. 光子学报, 2021, 50(7): 0706004.
- Ding P, Huang J B, Pang Y D, et al. A towed line array with weak fiber Bragg grating hydrophones[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(7): 0706004.
- [20] Dandridge A, Tveten A, Giallorenzi T. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, 18(10): 1647-1653.
- [21] 畅楠琪, 黄小砥, 王海斌. 基于 EKF 参数估计的光纤水听器 PGC 解调方法研究[J]. 中国激光, 2022, 49(17): 1709001.
- Chang N Q, Huang X D, Wang H B. Phase generated carrier demodulation approach in fiber-optic hydrophone based on extended Kalman filter parameter estimation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(17): 1709001.
- [22] Ming N, 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.
- [23] Kersey A D, Marrone M J. Input-polarisation scanning technique for overcoming polarisation-induced signal fading in interferometric fibre sensors[J]. *Electronics Letters*, 1988, 24(15): 931-933.
- [24] Ferreira L A, Santos J L, Farahi F. Polarization-induced noise in a fiber-optic Michelson interferometer with Faraday rotator mirror elements[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(28): 6399-6402.
- [25] Lin H Z, Ma L N, Hu Z L, et al. Multiple reflections induced crosstalk in inline TDM fiber Fabry-Perot sensor system utilizing phase generated carrier scheme[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(16): 2651-2658.
- [26] Jiang P, Ma L N, Wang W, et al. Crosstalk reduction and demodulation stability promotion in inline fiber Fabry-Perot sensor array using phase generated carrier scheme[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(3): 1006-1014.
- [27] Ma L N, Wang J, Hu Z L, et al. A low noise 8-TDM inline FBG interferometric sensor array for low frequency sensing[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 63: 102522.
- [28] Ma L N, Wang J, Hu Z L, et al. An ultra-low crosstalk and polarization independent inline interferometric fiber Bragg grating sensor array[C]//*Optical Fiber Sensors 2018*, September 24-28, 2018, Lausanne, Switzerland. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2018: ThE77.
- [29] Waagaard H O, Rnnekleiv E. Method and apparatus for providing polarization insensitive signal processing for interferometric sensors: US7359061B2[P]. 2008-01-03.
- [30] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 82-83.
- Liao Y B. *Optical fiber*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 82-83.

Low-Noise and Low-Crosstalk In-Line Interferometric Fiber Bragg Grating Hydrophone Array with Only FBGs at Wet End

Ma Lina, Shang Fan, Qi Yue, Bian Yujie, Xiong Shuidong*

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

Abstract

Objective The in-line interferometric fiber Bragg grating (FGB) hydrophone array contains only FBGs at the wet end. The dramatically reduced number of undersea components and fusion points leads to high reliability, lightweight, and miniaturization, which makes the FBG hydrophone a promising candidate for future large-scale and highly-integrated applications. However, the special undersea structure brings technical challenges in solving the problems of polarization-induced signal fading and random phase fading, and the bidirectional reflections of the FBG may increase the channel crosstalk. Although the in-line interferometric FGB hydrophone array is considered to be the most promising next-generation hydrophone, the above-mentioned technical challenges must be solved before its application in harsh marine

environments. Hence, this paper presents an in-line interferometric FGB hydrophone array to fully explore the system performance, providing experimental results before practical applications.

Methods The presented in-line interferometric FGB hydrophone array contains 64 sensing channels. A simple undersea design structure with only 80 FBGs is adopted to form 8SDM (space division multiplexing) \times 2WDM (wavelength division multiplexing) \times 8TDM (time division multiplexing) multiplexing hydrophone channels. FBGs with reflectivity less than 1% are fabricated to suppress the multi-reflection-induced channel crosstalk. The undersea hydrophone unit has a mandrel structure with dimension of $\phi 18 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, and the array has a diameter of 32 mm. A hybrid processing method of the phase generated carrier (PGC) and polarization switching (PS) is used to solve the polarization-induced signal fading and random phase fading problems simultaneously, and the PGC modulation frequency and PS modulation frequency are 12.5 kHz and 80 kHz, respectively.

Results and Discussions The measured acoustic sensitivity is about $(-131.15 \pm 1.15) \text{ dB}$, and the frequency response from 20 Hz to 2 kHz is presented with a fluctuation of less than $\pm 1.5 \text{ dB}$. The background phase noise is $-95 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 kHz, which indicates a low equivalent noise level of 36 dB@1 kHz. The SDM, WDM, and TDM channel crosstalks are less than -50 dB , -40 dB , and -40 dB , respectively.

Conclusions We present an in-line interferometric FGB hydrophone array that contains only 80 FBGs at the wet end. The effectiveness of the PGC-PS hybrid processing method and low reflectivity design is validated, and they can achieve satisfactory system performance. The research results show that the in-line interferometric FGB hydrophone array is suitable for practical applications.

Key words fiber optics; fiber-optic hydrophone; fiber Bragg grating; background phase noise; equivalent noise level; channel crosstalk