

光栅法布里-珀罗腔干涉型水听器阵列中的时域串扰

郭 振 高 侃 周少玲 沙剑波

中国电子科技集团公司第二十三研究所, 上海 200437

摘要 光栅法布里-珀罗腔干涉型水听器系统内的时域串扰严重限制了其实际应用, 因此, 对系统内时域串扰的产生机理进行分析, 讨论在相位产生载波(PGC)解调方法下干涉信号的幅度对其相位信息的影响, 并制作了两组不同反射率光栅水听器进行对比实验。实验表明, 高反射率($R=0.6$)光栅系统时分串扰明显, 串扰信号在满足 PGC 解调能力的基础上其相位信息不会明显衰减; 低反射率($R=0.02$)光栅实现了 34 dB 的串扰抑制。进一步研究发现, 低反射率光栅系统中的串扰主要由前端水听器单元外加信号引起的多普勒效应噪声和时分串扰噪声组成。

关键词 光纤光学; 光纤水听器; 光纤光栅; 相位产生载波解调; 串扰

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0706001

Time Domain Crosstalk in Fiber Bragg Grating Fabry-Pérot Interferometric Hydrophone Array System

Guo Zhen Gao Kan Zhou Shaoling Sha Jianbo

No.23 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 200437, China

Abstract Time domain crosstalk in fiber Bragg grating Fabry-Pérot (F-P) interferometric hydrophone array system limits its practical application seriously. So it is necessary to analyze the generating mechanism of time domain crosstalk. With the phase generator carrier (PGC) demodulation, the effect of amplitude on phase is discussed for the interference signal. Then two comparative hydrophone systems with different reflectivities of fiber Bragg grating are fabricated and tested. Experimental results show that amplitude of the crosstalk is high for the demodulation signal with high reflectivity of grating ($R=0.6$), because the phase of the crosstalk signal hardly reduces on the basis of the PGC demodulation. On the other hand, the crosstalk has about 34 dB suppression with the low reflectivity of grating ($R=0.02$). Furthermore, the crosstalk in low reflectivity grating system is verified to be composite of the Doppler noise of precedent hydrophones and time domain crosstalk.

Key words fiber optics; fiber hydrophone; fiber Bragg grating; phase generator carrier demodulation; crosstalk

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 190.7070

1 引 言

光纤水听器相对于传统的压电水听器具有灵敏度高、抗电磁干扰、结构简单和易于复用等特点^[1-3]。随着光纤水听器技术的不断完善,其阵列正朝着大规模、多单元的方向发展。而传统干涉型结构的光纤水听器系统通常比较复杂,元器件数目较多,阵列规模的增加会影响系统的整体性能和可靠性,且不利于实际操作^[4-8]。1990年,Morey等^[9]利用光纤光栅作反射器构成双光栅法布里-珀罗(F-P)腔干涉型水听器,实现了水听器阵列的全光纤化,大大简化了结构,减少了耦合器和熔接点数目。基于此结构,Kirkendal等^[10]于2007年实现了探头直径仅为10 mm的超细线型拖曳阵列系统,采用时分和波分技术,在4根光纤上实现了上百单元水听器的复用。Nakstad等^[11]通过复用技术在200 km的传输光缆上安装了4000个传感基元,每个基元由3个加速度计、1个水听器和1个参考单元构成,从而实现了约20000单元规模的光栅F-P腔型海底地震和能源探测水听传感器系统。

收稿日期: 2016-01-11; **收到修改稿日期:** 2016-03-08

基金项目: 上海市科学技术委员会资助课题(13dz1204500)

作者简介: 郭 振(1985-),男,博士,工程师,主要从事光纤传感和光纤水听器方面的研究。

E-mail: zhenguo.cetc23@hotmail.com

虽然利用光栅 F-P 型结构可以实现水听器系统的全光纤化,但其关键技术问题仍需要解决。由于没有考虑偏振补偿,两干涉脉冲偏振态有可能相互垂直无法干涉,引起偏振衰落;随着复用技术的不断发展,阵列中单元数量增加,光栅型水听器中存在串扰现象。串扰是由于光纤光栅的透射和反射双重作用,访问脉冲在系统中经历多次无序反射后与其他周期的访问脉冲相干而形成的。串扰不仅会限制系统的时分复用能力,而且会影响各个单元的检测灵敏度。针对此现象,Kersy 等^[12]通过把反射率降低到 5% 以下,将时分串扰抑制到 -26 dB;Cranch 等^[13]利用锁模激光器产生谱宽大于 60 nm 的脉冲光,通过降低光源的相干长度来抑制系统内的时域串扰;Waagaard 等^[14-15]则通过研究时域串扰产生的原理,利用剥层算法在信号处理端来抑制时域串扰,将系统的时域串扰抑制到 -40 dB 以下。

本文分析了光栅 F-P 腔型水听器内时域串扰形成原理以及对 PGC 信号解调系统的影响,讨论了返回干涉脉冲幅度与解调相位信息的关系,进一步分析了水听器内的串扰现象,并在实验上利用不同反射率的对比光栅组进行验证。实验结果与理论分析一致,均表明采用低反射率光栅可有效地抑制了系统内时分串扰。

2 光栅 F-P 腔型水听器串扰原理

2.1 光栅 F-P 腔型水听器工作原理

光栅 F-P 腔型水听器的工作原理如图 1 所示。水听器单元由传感线圈与两侧对称分布的两个光栅组成。当访问脉冲进入水听器阵列时,会在第 1 个光纤光栅处发生部分反射形成光纤布拉格光栅 1 (FBG1) 反射脉冲

$$E_1 = E_0 \sqrt{R} \cos(\omega_m t + \varphi_1), \quad (1)$$

式中 R 为光栅反射率, ω_m 为载波信号频率, φ_1 为初始相位常量。透射光将会经过传感线圈并携带传感信息,在下一个光栅处发生部分反射形成光纤布拉格光栅 2 (FBG2) 反射脉冲

$$E_2 = E_0 (1 - \alpha) \sqrt{R} (1 - R)^2 \cos(\omega_m t + \varphi_s + \varphi_2), \quad (2)$$

式中 α 为传感线圈损耗系数, φ_s 为传感相位信息。为了实际设计需求,在两传感器中间加入长度与传感线圈一致的延时线圈。经过延时线圈后,光脉冲进入下一个水听器单元,同样产生反射脉冲 FBG3 和 FBG4。反射脉冲串经过补偿干涉仪形成干涉信号,这时脉冲 FBG1 和 FBG2 的干涉信号就携带了第 1 个水听器的信息,同样脉冲 FBG3 和 FBG4 的干涉信号则携带了第 2 个水听器的信息。对应干涉脉冲的对比如为

$$V = \frac{2(1 - \alpha)(1 - R)}{1 + (1 - \alpha)^2 (1 - R)^2}. \quad (3)$$

从(3)式看出,干涉信号对比度随着损耗和光栅反射率的降低而增加。另一方面,光栅反射率决定两路干涉信号的幅值,过低的反射率会降低解调信号的信噪比。

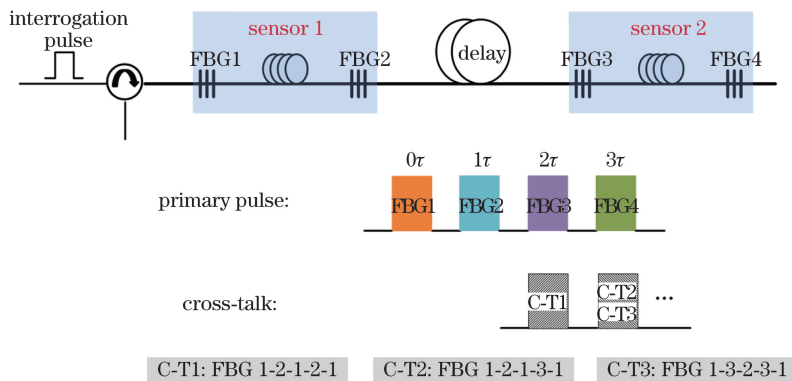


图 1 光栅 F-P 腔型水听器中时域串扰原理图

Fig. 1 Schematic diagram of time domain crosstalk in fiber Bragg grating F-P hydrophone system

2.2 水听器中的串扰

系统内串扰是由光栅的反射和透射双重特性引起的,如图 1 中脉冲 FBG2 发生反射后经过光栅 1 时,仍然会有部分光发生后向反射,再经光栅 2 反射回到接收端,称之为 C-T1。脉冲 C-T1 的周期与 FBG3 重合,

因此形成串扰信号。在第 2 个水听器单元解调信号的 3τ 周期上,同样存在如图 1 所示的 C-T2 和 C-T3 串扰。随着阵列单元数目的增加,每个访问脉冲在经过一次光纤光栅时都会产生反射和透射两个脉冲,故形成干扰脉冲的数目呈指数增加。

当水听器内采用低反射率光栅时,仅需考虑一阶串扰(即访问脉冲在系统内发生 3 次以内的反射)的情况。第 n 个光栅反射的传感信号脉冲可以表示为

$$E_n = E_0 (1 - \alpha)^n \cos(\omega_m t + \varphi_s + \varphi_n) \sqrt{(1 - R)^{2(n-1)} R}。 \quad (4)$$

对应的一阶串扰脉冲为

$$E_{C-T} = E_0 (1 - \alpha)^n \cos(\omega_m t + \varphi_s + \varphi_{C-T}) \sqrt{(1 - R)^{2(n-2)} R^3}。 \quad (5)$$

因此该光栅反射的信号与串扰的能量比为 $(1 - R)^2 / R^2$ 。对于第 n 个光栅,系统产生的一阶串扰脉冲数目为^[16]

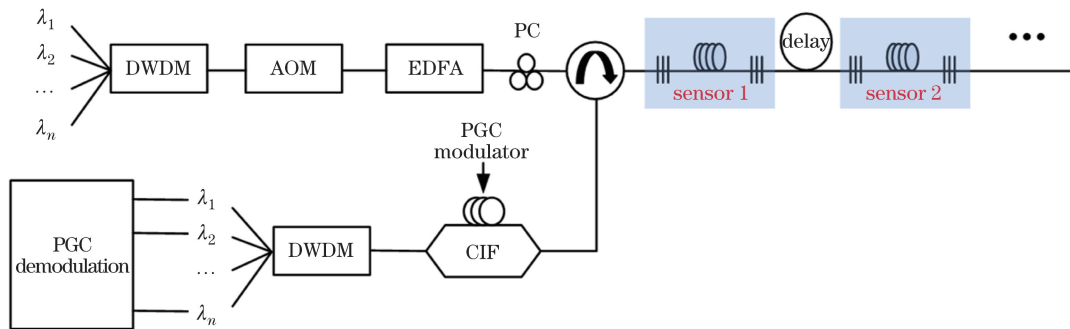
$$N = \frac{(n - 2)(n - 1)}{2}。 \quad (6)$$

光栅型水听器中传感信号脉冲由第 n 个光栅的反射脉冲与第 $n + 1$ 个光栅的反射脉冲干涉产生。在 $n\tau$ 周期内,返回脉冲分为传感信号脉冲和串扰脉冲两种,其中总的串扰脉冲数目为第 n 个光栅和第 $n + 1$ 个光栅的串扰脉冲数目之和,根据(6)式得出总串扰脉冲数为 $(n - 1)^2$ 。串扰脉冲与信号脉冲发生混叠后,信号脉冲干涉后产生携带水听器传感信号分量,而其余串扰信号相互干涉后就产生噪声分量,影响系统性能。

3 实验及结果分析

串扰信号相对于传感信号至少要多两次以上的反射,因此降低光栅反射率就成为抑制系统内时分串扰最简单有效的方法。实验制作了中心波长为 1554.9 nm、反射率为 60% 和中心波长为 1553.3 nm、反射率为 2% 的两组光栅,线宽均为 0.2 nm,光栅栅区长度为 5 mm,旁瓣抑制比为 27.3 dB。根据图 1 制作水听器阵列,4 个光栅均选择同一中心波长光栅,构成两时分系统。传感线圈长度为 63.8 m,其中第 1 和第 3 个线圈绕制在压电陶瓷(PZT)上,形成两个模拟水听器单元,中间延时线圈长度同样为 63.8 m。

实验测试装置如图 2 所示,光源采用中心波长为 1553.3 nm 或 1554.9 nm 的分布式反馈(DFB)激光器,输出功率分别为 6.76 dBm 和 6.37 dBm。入射光经过声光调制器(AOM)产生脉冲光,脉冲重复频率为 200 kHz,脉冲宽度为 260 ns。脉冲光经掺铒光纤放大器(EDFA)放大以保证探测脉冲功率,偏振控制器(PC)调节输出干涉脉冲的对比度,避免偏振衰落现象。经水听器返回的脉冲经过相位产生载波(PGC)补偿干涉仪形成干涉脉冲,补偿干涉仪中延时线圈长度为 63.8 m,调制频率为 20 kHz。在 1 kHz 时的系统相位噪声经 100 次测量后的平均值约为 $-89.7 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$,如图 3(a)所示。然后测试低反射率光栅组性能,在水听器的第 1 个单元 PZT 上外加频率为 800 Hz 的激励信号,测得在 1τ 周期的信号幅值为 -1.81 dB ,如图 3(b)所示。同样情况下测试高反射率光栅组,在 1τ 周期测得的信号幅值为 -1.62 dB 。



MUX: multiplexer; AOM: acoustic optical modulator; EDFA: erbium doped fiber amplifier; PC: polarization controller; PZT: piezoelectric transducer; PGC: phase generator carrier; DWDM: dense wavelength division multiplexing; CIF: compensate interferometer fiber

图 2 时域串扰测试实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of time domain crosstalk

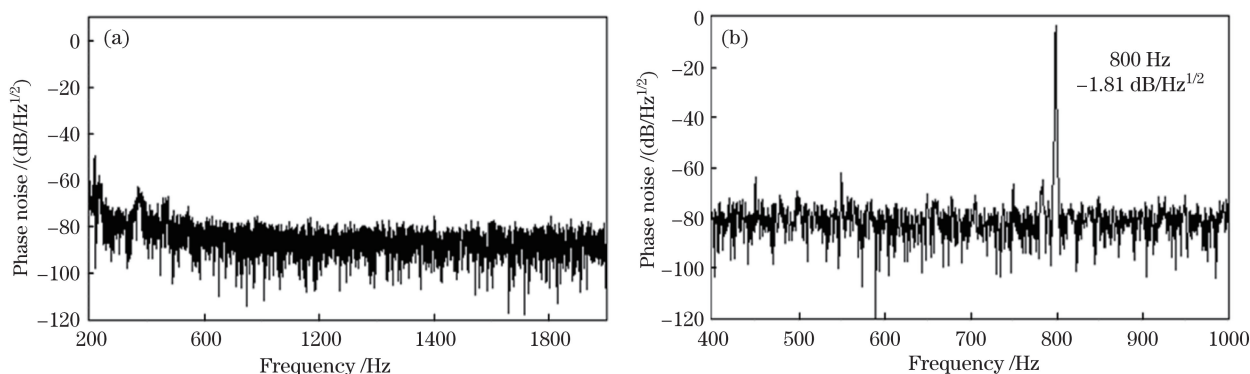


图 3 (a)水听器中相位噪声谱和(b)低反射率光栅组外加 800 Hz 下的解调信号

Fig. 3 (a) Phase noise of hydrophone system and (b) its demodulation result of an 800 Hz signal with low reflectivity gratings

3.1 返回干涉脉冲幅度对信号解调的影响

水听器内选择中心波长为 1554.9 nm、反射率为 60%的高反射率光栅,制作两时分模拟阵列。通过可调衰减器控制返回脉冲光功率,然后研究系统中解调信号的变化情况。在第 1 个水听器单元的 PZT 上引入激励信号,因此 1τ 周期干涉脉冲就对应着第 1 个水听器单元信号。从图 4 可以看出,随着返回光功率从 -34.7 dBm 降低到 -50.1 dBm,在 1τ 周期的解调信号幅度均为 1.88 dB 左右,没有发生明显变化,说明光栅 F-P 腔型水听器的 PGC 解调信号与反射信号幅度大小无关,仅与干涉脉冲携带的相位信息有关。在 2τ 及以后周期的返回脉冲相对于 1τ 周期的返回脉冲会经历多次光栅反射,返回干涉脉冲幅度产生相应衰减。当对应返回光功率为 -34.7 dBm 时,虽然脉冲幅度大小随着时间的增加而减小,但解调信号大小稳定在 1.88 dB,验证了上述结论。另外随着返回光功率的降低,返回脉冲信号的解调能力也随着降低。当返回光功率降低至 -50.1 dBm 时,在 4τ 周期产生的信号衰减会影响解调稳定性,解调信号降低到 -2.1 dB。随着时间的进一步增加,在 6τ 周期内串扰引起的噪声超过解调信号幅度,无法正常工作。上述实验结果表明,在水听器阵列中,信号脉冲幅度虽然经过多次反射后产生衰减,但其干涉信号携带的相位信息并未丢失,只要满足信号解调的基本条件,其相位信息就会被完全恢复。另一方面,从解调原理上看,传感信息是返回干涉脉冲的相位信息,而非返回脉冲的幅度信息。由于 PGC 解调过程需要对两路信号进行比较,因此在保证干涉信号幅度满足 PGC 信号解调能力的基础上,返回干涉信号幅值大小只会影响解调信号的信噪比,而不会影响解调相位信息的大小。

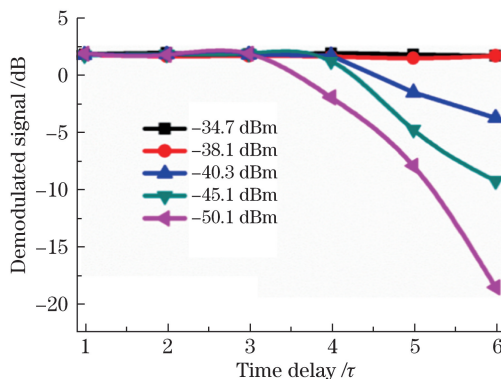


图 4 返回功率不同时 PGC 解调信号与返回脉冲周期的关系曲线

Fig. 4 Demodulated PGC signals versus the period of the interference pulse at different powers

3.2 系统串扰的影响

光栅 F-P 腔型水听器阵列的时域串扰主要来自光栅之间多次无序反射。为了分析水听器单元之间的串扰分布情况,在第一个 PZT 上加入信号,然后分别测试随后周期的解调信号幅度,由于后端无其余外加信号,其检测信号幅值就表示第 1 个单元对后续单元的时分串扰大小。

对于反射率为 60%的高反射率光栅水听器阵列,当返回光功率为 -35.1 dBm 时,PGC 解调系统下发现其后周期信号解调大小并未随着时间的增加而减小,在 $2\tau \sim 6\tau$ 周期上测得信号幅度为 -2 dB 左右,如图 5

圆点线所示。虽然仅在 1τ 周期上有外加信号,但其信号带来的时分串扰十分明显,与前述实验结果一致。说明在高反射率光栅情况下,系统的串扰会严重影响其后单元的信号解调,使其无法工作。

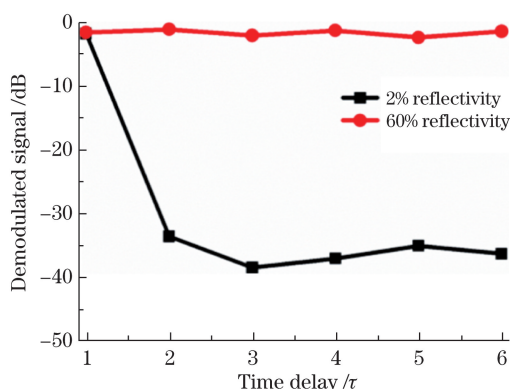


图5 光栅反射率不同时 PGC 解调信号与返回脉冲周期的关系曲线

Fig. 5 Demodulated PGC signals versus the period of the interference pulse for different reflectivity of gratings

对于反射率为 2% 的低反射率光栅水听器阵列,其抑制时域串扰能力则比较明显。如图 5 方框线所示,当 1τ 周期信号幅度为 -2.1 dB 时,在 2τ 周期的串扰信号幅度就降低到 -33.67 dB,随着时间的延长,串扰大小维持在 -36 dB 左右。

另外多次杂乱的反射也会提高信号本底噪声,如图 6(a) 所示,在第一单元 PZT 上加入 -1.81 dB 信号时,在高反射率光栅下的 5τ 周期信号解调幅度为 -2.41 dB,但其本底相位噪声已经由原来的 -95 dB 提高到 -65 dB。随着时间的进一步增加,在 7τ 周期噪声已超过信号幅度,无法进行正常信号解调。但低反射率光栅可以很好抑制该串扰噪声,如图 6(b) 所示,信号串扰在 5τ 周期内抑制到 -35.12 dB。

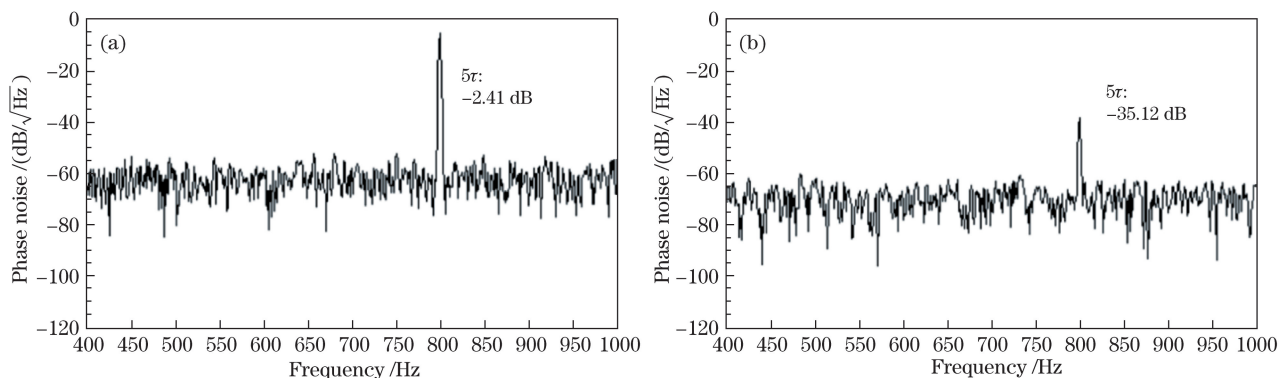


图6 在第 1 单元 PZT 上加入 -1.81 dB 信号时,在第 5τ 周期的串扰信号。(a)高反射率光栅;(b)低反射率光栅

Fig. 6 With the applied signal of -1.81 dB on the first hydrophone, the crosstalk of 5τ time delay.

(a) High reflectivity gratings; (b) low reflectivity gratings

由上述高反射率光栅串扰分析中得到干涉脉冲携带的相位信息并不会随着脉冲幅度的减小而衰减,这与低反射率光栅时的串扰不同,另外串扰大小也并未随着时间的延长而进一步减小。

进一步研究表明,该串扰是由前端信号单元产生的多普勒效应引起的,现有多普勒效应研究主要是抑制拖曳阵中拖缆抖动问题^[17]。而在此水听器结构中,该多普勒效应的原理是返回脉冲经过前端信号单元时,如果前端单元存在 $\varphi(t) = A \sin \omega t$ 的信号调制,而两个脉冲经过该单元存在 τ_s 的时延,那么两脉冲会产生 $\Delta\varphi(t) = 2\pi\nu\tau_s\omega A \cos \omega t$ 的相位差,其中 ν 为激光器频率。为了验证该效应,加工制作两个水听器单元系统,其中第 1 个单元光栅的中心波长为 1553.3 nm,反射率为 2%;第 2 个单元光栅的中心波长为 1554.9 nm,反射率为 60%,光栅线宽为 0.2 nm,两光栅波长通道隔离度为 35.2 dB,保证抑制波分之间串扰。在入射端仅注入 1554.9 nm 的光,并在第一个 1553.3 nm 单元的 PZT 上外加 800 Hz 的信号,同样发现了 -38.32 dB 的串扰信号,验证了该多普勒效应。因此可以说明,低反射率光栅对时域多次反射的串扰起到了比较好的抑制效果,但需要进一步研究消除串行结构中多普勒效应的抑制方法。

4 结 论

本文研究了单光纤光栅 F-P 腔型水听器中时域串扰的抑制方法。分析了光栅型水听器内时域串扰形成的原理及其对相位产生载波 (PGC) 信号解调系统的影响, 讨论了返回干涉脉冲幅度与解调相位信息的关系, 然后制作了不同反射率的光栅组并进行对比验证。实验发现, 在 PGC 相位信号解调系统下, 在满足信号解调能力的基础上降低干涉信号的幅度不会影响其相位信息的幅度, 因此对于光栅反射率较高的水听器阵列其时域串扰信号明显, 全部相位信息都会串扰影响到后面单元; 而降低反射率可以有效抑制阵列中时域串扰, 这为单光纤型光栅阵列的实用化提供了理论和实验依据。另外在降低时域串扰之后, 实验发现前端单元信号调制会对后端单元产生多普勒效应, 该效应物理机理与时域串扰不同, 需要进一步设计方案 (如缩短传感线圈长度等) 来降低阵列噪声。

参 考 文 献

- 1 Bucaro J A, Dardy H D, Carome E. Fiber-optic hydrophone[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1977, 62(5): 1302-1304.
- 2 Davis A R, Kirkendall C K, Dandridge A, *et al.*. 64 channel all optical deployable acoustic array[C]. 12th International Conference on Optical Fiber Sensor, 1997, 16: OFA6.
- 3 Cranch G A, Nash P J, Kirkendall C K, *et al.*. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2003, 3(1): 16-30.
- 4 Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, *et al.*. Fiber grating sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1442-1463.
- 5 Cao Chunyan, Xiong Shuidong, Hu Zhengliang, *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.
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.
- 6 Wu Bingyan, Gao Kan, Chen Jingfeng, *et al.*. Applications of fiber optic hydrophone array in water-way monitoring of the Huangpu river[J]. Optical Fiber & Electric Cable, 2015(2): 27-30.
吴昞炎, 高 侃, 陈靖峰, 等. 光纤水听器阵列在黄浦江航道监测中的应用[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2015(2): 27-30.
- 7 Jin Mengqun, Zhang Zili, Wu Guojun, *et al.*. A three dimensional vector hydrophone based on fiber-optic flexural disk accelerometer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 42(3): 0305004.
金梦群, 张自丽, 吴国军, 等. 基于光纤蝶型加速度传感单元的三维柱形矢量水听器[J]. 中国激光, 2014, 42(3): 0305004.
- 8 Wang Wei, Li Dongming, Zhang Zili, *et al.*. Suppression of transmission fiber induced noise in remotely optical fiber hydrophone system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 51(11): 110601.
王 巍, 李东明, 张自丽, 等. 远程光纤水听器系统中传输光纤引入噪声的抑制[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 51(11): 110601.
- 9 Morey W W, Meltz G, Glenn W H. Fiber optic Bragg grating sensors[C]. SPIE, 1989, 1169: 98-107.
- 10 Kirkendall C, Barock T, Tevten A, *et al.*. Fiber optic towed arrays[R]. NRL Review, 2007: 121-123.
- 11 Nakstad H, Kringlebotn J T. Realisation of a full-scale fiber optic ocean bottom seismic system[C]. SPIE, 2008, 7004: 700436.
- 12 Kersey A D, Dorsey K L. Crosstalk in a fiber-optic Fabry-Perot sensor array with ring reflectors[J]. Optics Letters, 1989, 14(1): 93-95.
- 13 Cranch G A, Flockhart G M H, Kirkendall C K. Efficient fiber Bragg grating and fiber Fabry-Perot sensor multiplexing scheme using a broadband pulsed mode-locked laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(1): 3795-3806.
- 14 Waagaard O H, Ronnekleiv E. Reduction of crosstalk in inline sensor arrays using inverse scattering[C]. SPIE, 2008, 7004: 70044Z.
- 15 Lin H, Ma L, Hu Z, *et al.*. Multiple reflection induced crosstalk in inline TDM fiber Fabry-Perot sensor system utilizing phase generated carrier scheme[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(16): 2951-2958.
- 16 Kirkendall C K, Dandridge A. Overview of high performance fiber-optic sensing[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37(18): R197-R216.
- 17 Waagaard O H, Ronnekleiv E, Forbord S, *et al.*. Suppression of cable induced noise in an interferometric sensor system [C]. SPIE, 2009, 7503: 75034Q.