

文章编号 1004-924X(2017)09-2317-07

空间差分干涉的光纤分布式水下声波测量

董 杰

(山东青年政治学院 信息工程学院, 山东 济南 250103)

摘要: 为了实现大范围的水下微弱声波探测, 提出了一种基于后向瑞利散射空间差分干涉的光纤分布式声波检测(DAS)技术。声波振动引起单模传感光纤中后向瑞利散射光的变化, 将含有声波信息的后向瑞利散射光注入到非平衡迈克尔逊干涉仪, 调节干涉仪的臂长差实现不同长度的相邻空间段的后向瑞利散射光干涉, 然后采用 3×3 耦合器解调技术解调出相位信息, 实现声波信号的测量。实验搭建了一套基于 DAS 技术的水下声波测量系统, 该系统不仅能够实时准确定位两个声波位置, 还能还原声波的幅值、频率、相位等信息, 并且实现了 1 kHz 情况下的 -148.8 dB(re rad/ μ Pa) 水下声压相位灵敏度, 100~1 500 Hz 频率的频响平坦度在 1.2 dB 之内。实验结果证实 DAS 技术能够实时快速实现多个声波信息的定量测量。

关键词: 光纤传感; 后向瑞利散射; 空间差分干涉; 非平衡迈克尔逊干涉仪; 声压相位灵敏度

中图分类号: TP212.1; TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172509.2317

Measurement of underwater acoustic wave using optical distributed acoustic sensing based on space difference

DONG Jie

(School of Information Engineering,
Shandong Youth University of Political Science, Jinan 250103, China)

* Corresponding author, E-mail: dj@sdyu.edu.cn

Abstract: To detect weak underwater acoustic signal over large areas, an optical Distributed Acoustic Sensing(DAS) scheme based on space difference of Rayleigh backscattering was presented. In this scheme, Rayleigh backscattered light with phase changes induced by the acoustic signal along a single-mode sensing fiber was split and fed into an imbalanced Michelson interferometer. Adjusting the path difference of the imbalanced Michelson interferometer, the Rayleigh backscattered light interference of different lengths of adjacent space segments along the sensing fiber was realized. Subsequently, the phase information including the acoustic signal was demodulated by the 3×3 coupler demodulation technology. An underwater acoustic wave measuring system based on DAS was implemented, which can not only locate the two acoustic positions accurately in real time, but also restore the amplitude, frequency and phase of sound waves. In addition, the acoustic phase sensitivity is -148.8 dB(re rad/ μ Pa) at 1 kHz, and the frequency response flatness at frequencies ranging from 100 Hz to 1 500 Hz is within

收稿日期: 2017-04-28; 修订日期: 2017-06-23.

基金项目: 山东省科技发展计划资助项目(No. 2015GSF120001); 山东省高校科技计划资助项目(No. J12LN15); 山青院重点课题资助项目(No. 2015ZD08)

1.2 dB. The experimental results confirm that the novel Φ -OTDR technology can enable quantitative measurements of multiple acoustic information in real time.

Key words: optical fiber sensing; Rayleigh backscattering; space difference; imbalanced Michelson interferometer; acoustic phase sensitivity

1 引言

水声信号在建筑、地球物理和军事领域具有重要应用^[1],通常采用光纤水听器进行测量。光纤水听器分为点式^[2-3]和分布式传感器^[4],其中点式传感器存在复用容量不够大、大范围布阵困难以及传感器之间的信号串扰等难题,不适于大范围面积下的实时检测。分布式传感器分为干涉式和反射式。干涉式传感器主要有 Michelson^[5]干涉仪, Mach-Zehnder^[6]干涉仪, Sagnac^[7]干涉仪以及双 Sagnac^[8]、Sagnac-Machelson^[9]等多种复合结构干涉仪。干涉式传感器对于相位变化具有很高的灵敏度,但是单结构干涉传感器易受环境干扰,不能同时检测多个扰动点,复合式干涉传感器的扰动点定位复杂、光路繁琐。光纤分布式时域反射^[10](Optical Time Domain Reflectometry, OTDR)传感器的原理基于光纤外部干扰引起的瑞利、拉曼和布里渊效应。其中,拉曼效应主要用于温度测量;布里渊效应用来测试应变信号,但不适用于快速动态信号的检测。目前,基于瑞利散射的 OTDR 技术主要由传统 OTDR^[11-12]、相敏 OTDR^[13-14](Φ -OTDR)和相干 OTDR(C-OTDR)^[15]组成。传统的 OTDR 是基于宽带光源的强度解调,系统的灵敏度受到限制。 Φ -OTDR 是采用窄线宽光脉冲作为 OTDR 的探测光源,此系统将一个光脉冲内不同散射中心之间的相干叠加形成的相位信息转化为强度信息进行振动信息的检测,其灵敏度虽然高于传统 OTDR 的灵敏度,但受限于强度解调,在微弱信号检测方面的应用受到限制。C-OTDR 利用本地光与后向瑞利散射光干涉,采用相位信息的解调方案提高了灵敏度,但本地光与后向瑞利散射光干涉时的偏振严重影响系统性能。

基于以上问题,本文提出了一种基于后向瑞利散射空间差分干涉的光纤分布式声波检测(Distributed Acoustic Sensing, DAS)技术。该技术将含有声波信号的后向瑞利散射信号注入到非

平衡迈克尔逊干涉仪中,调制干涉仪的臂长差实现不同长度的相邻空间段内的后向瑞利散射光干涉,采用 3×3 耦合器解调技术解调出相位信息,实现声波信号的测量。该技术定位简单,并且相邻空间段内的瑞利散射光的偏振态及光强近似相同,利于得到高信噪比的声波信号。

2 DAS 工作原理

2.1 后向瑞利散射光的空间差分干涉原理

参考单个脉冲周期内光纤后向瑞利散射光在无扰动情况下振幅的一维脉冲响应模型^[16-17],假设探测信号是频率为 f 的准单色矩形脉冲,脉宽为 ω ,同时假设该光源的相干时间与脉宽 ω 相比足够大。在 $t=0$ 时将这样一个光脉冲发射进光纤,在光纤输入端获取后向瑞利散射光 $e_r(t)$,可得^[18]:

$$e_r(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos[2\pi f(t - \tau_i)] \text{rect}\left[\frac{t - \tau_i}{\omega}\right], \quad (1)$$

式中: a_i 和 τ_i 分别是第 i 个散射点的振幅和时间延迟, N 是设定的散射中心个数。当 $(t - \tau_i)/\omega \leq 1$ 时,矩形函数 $\text{rect}[(t - \tau_i)/\omega] = 1$, 否则为 0。时间延迟 τ_i 和从输入端到第 i 个散射的光纤长度 l_i 的关系为 $\tau_i = (2n_i l_i)/C$, 其中 C 是真空中光速, n_i 是光纤折射率。

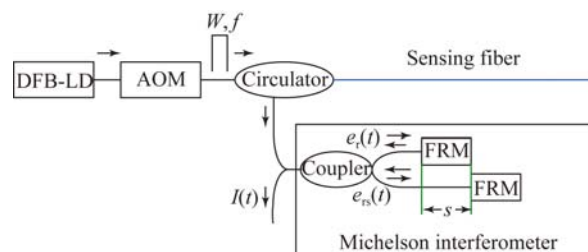


图 1 后向瑞利散射光的空间差分干涉原理图

Fig. 1 Schematic diagram of space difference of Rayleigh backscattering

如图 1 所示,非平衡干涉仪的臂长差为 s , 延

时信号 $e_{rs}(t)$ 为^[19]:

$$e_{rs}(t) = \sum_{j=1}^N a_j \cos[2\pi f(t - \tau_j - \tau_s)] \cdot \text{rect}\left(\frac{t - \tau_j - \tau_s}{\omega}\right). \quad (2)$$

干涉仪的干涉光强为:

$$I(t) = [e_r(t) + e_{rs}(t)] \times [e_r(t) + e_{rs}(t)]^* = I_{rr} + I_{rs} + I_{rrs}, \quad (3)$$

式中:

$$I_{rr} = \sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^N a_i a_p \cos \varphi_{ip} \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i}{\omega}\right),$$

$$I_{rs} = \sum_{j=1}^N \sum_{q=1}^N a_j a_q \cos \varphi_{jq} \text{rect}\left(\frac{t - \tau_j - \tau_s}{\omega}\right),$$

$$I_{rrs} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_i a_j \cos \varphi_{ij} \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i - \tau_s}{\omega}\right).$$

$$\text{rect}\left(\frac{t - \tau_j - \tau_s}{\omega}\right),$$

$$\varphi_{ip} = 2\pi f(\tau_i - \tau_p),$$

$$\varphi_{jq} = 2\pi f(\tau_j - \tau_q),$$

$$\varphi_{ij} = 2\pi f \tau_{d_i} = \frac{4\pi f n_l}{c} s.$$

如式(3)所示,干涉信号包含由声信号引起的相位信息,只要解调相位信息,则 DAS 系统可以定量地恢复声源的信号幅度、相位和频率等相关信息。

2.2 3×3 光纤耦合器解调原理

系统采用 3×3 耦合器对光纤干涉信号进行相位解调。探测器探测到的光强可表示为^[20]:

$$I_k = D + I_0 \cos[\varphi(t) - (k-1) \times (2\pi/3)], \quad k=1, 2, 3, \quad (4)$$

式中: $\varphi(t) = \phi(t) + \psi(t)$; D 是各路输出的平均光强; I_0 是干涉条纹的峰值强度; k 是输出的光路序号, $k=1, 2, 3$; $\phi(t)$ 是两传感臂上信号的相位差,即待测信号; $\psi(t)$ 是在实际环境中由环境变化引起的相位差。

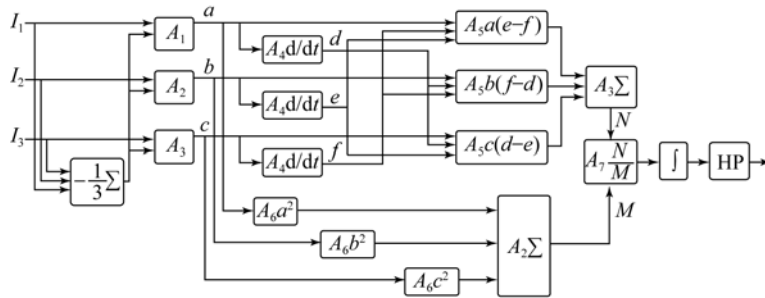


图 2 3×3 光纤耦合器解调框图

Fig. 2 Block diagram of 3×3 coupler demodulation

3×3 耦合器的相位解调方法如图 2 所示。图中, $A_1 \sim A_7$ 分别是相应加法器、加法器、加法器、微分器、乘法器、平方器与除法器的增益。为方便推导,先令 $A_1 \sim A_7$ 均为 1。图 2 中将 3 路输出信号 $I_1 \sim I_3$ 相加,相加以后的和再乘以 1/3,得到第一个加法器的输出,然后 3 路光强信号减去第一个加法器的输出,消除直流因子的影响,然后经过微分交叉相乘、累加、积分运算后输出得:

$$V_{out} = \sqrt{3} \varphi(t) = \sqrt{3} [\phi(t) + \psi(t)]. \quad (5)$$

由于 $\psi(t)$ 是缓变量,经过高通滤波器来滤除这个缓变量,从而解调出待测信号 $\phi(t)$ 。

3 实验设计

3.1 实验光路设计

图 3 是 DAS 系统光路图,使用线宽为 5 kHz

的分布反馈激光二极管 (Distributed Feedback Laser Diode, DFB-LD) 作为光源,产生功率为 10 mW 的连续光。通过声光调制器 (Acoustic Optical Modulation, AOM) 将连续光调制成具有 20 kHz 重复频率的脉冲,调制脉冲由掺铒光纤放大器 (Erium Dopted Fiber Amplifier, EDFA) 放大。EDFA 的输出由窄带滤波器滤波,以消除自发辐射。调制脉冲通过环形器注入长度为 750 m 的标准单模传感光纤。后向瑞利散射光由另一个 EDFA 放大、滤波,经过环形器进入到 3×3 光纤耦合器的输入端,后向瑞利散射信号经过非平衡干涉仪返回到环形器和 3×3 光纤耦合器的另两端,最后由 3 路光电检测器 (PD_1, PD_2, PD_3) 接收干涉光,以产生包含后向瑞利散射信息的电信号。该信号由具有 100 MHz 采样率的 PC 采集,然后

由 3×3 光纤耦合器解调模块解调。

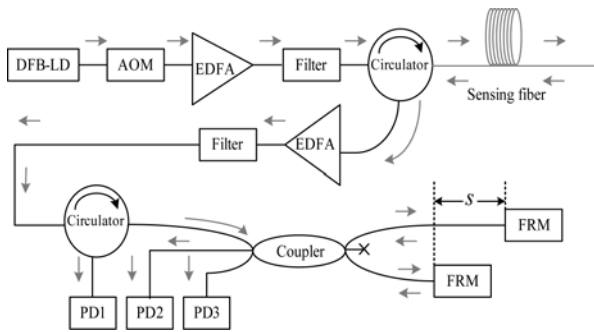


图 3 DAS 系统光路图

Fig. 3 Optical path of proposed Φ -OTDR system

3.2 实验系统设计

实验装置如图 4 所示。首先完成两处传感光纤位置的设置,在传感光纤长度为 215 m 处设置一个传感光纤环,距离水下扬声器为 5 cm,完成第一个测量点设置,将长度为 430 m 处的光纤绕制在一个圆柱形压电陶瓷(PZT)的表面,完成第二个测量点设置;然后完成声波产生装置及解调的设置,将水下扬声器固定在水箱中。水下扬声器及压电陶瓷同时由信号发生器驱动,发出频率为 300 Hz 的声波信号。频率为 900 Hz 的正弦信号驱动压电陶瓷,使用 DAS 声波检测系统解调声源的位置和时域波形信息;最后完成声压相位灵敏度的计算。水下扬声器发出频率为 1 kHz 的声波信号,使用压电水听器解调装置测量传感光纤环位置处的声压,同时使用 DAS 声波检测系统解调声源的幅值和频率信息,结合它们的实验数据进行声压相位灵敏度的计算。

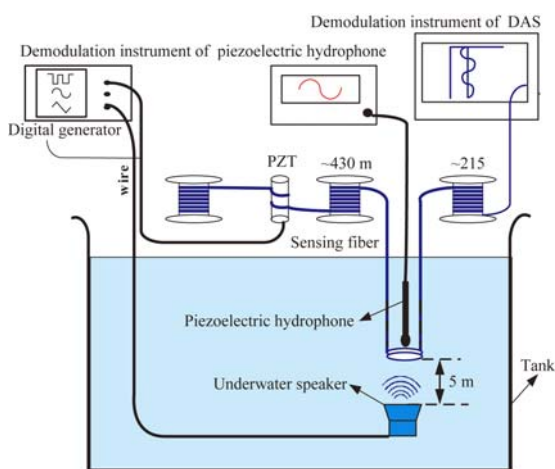


图 4 实验系统装置框图

Fig. 4 Block diagram of Φ -OTDR experimental system

4 实验结果及分析

图 5 是 750 m 光纤解调相位变化的三维图。215 m 处出现了频率为 300 Hz 的正弦信号,此信号是水下扬声器产生的声波振动信号,在 430 m 处有频率为 900 Hz 的正弦信号出现,此信号是 PZT 产生的振动信号。由图 5 可以看出,DAS 声波检测系统能够同时准确定位多个声源。图 6 是解调信号的时域图。在时域中解调波形信息图中,DAS 系统能够同时解调不同位置处声波信号的幅度和相位信息。

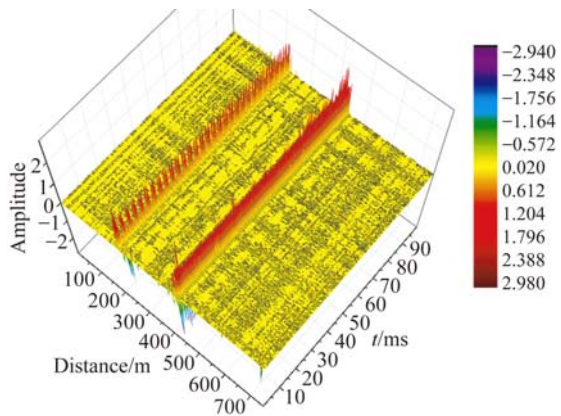


图 5 DAS 系统解调三维图

Fig. 5 3-D demodulation diagram of DAS system

信号发生器产生频率为 1 kHz 的正弦信号驱动水下扬声器,使用压电水听器测量水下扬声器发出的声波信号,声波信号的时域波形如图 7 的蓝线所示,解调数据的 FFT 结果如图 8 的蓝线所示(彩图见期刊电子版)。根据图 8 的 FFT 结果,可以推算出频率为 1 kHz 的声波信号的振幅约为 34 mV,然后根据压电水听器的灵敏度为 500 Pa/V,可以得出传感光纤环处的声压为 17 Pa。DAS 声波检测系统解调后的声波时域波形如图 7 的红线所示,FFT 结果如图 8 的红线所示。根据 FFT 结果可以计算出 DAS 声波检测系统解调频率为 1 kHz 的声波信号的振幅为 0.617 V,由 17 Pa 声压引起的相位变化为 0.617 rad,相位灵敏度为 0.036 3 rad/Pa,其值等于 $-148.8 \text{ dB}(\text{re rad}/\mu\text{Pa})$ 。实验标定了 DAS 系统的声压相位灵敏度,此系统可以用来定量监测水下声波信号。

在相同情况下进行了 100~1 500 Hz 频率的声压相位灵敏度频响测试,解调结果的时域波形如图 9 所示(彩图见期刊电子版),声压灵敏度计算结果如表 1 所示,频响平坦度在 1.2 dB 之内。

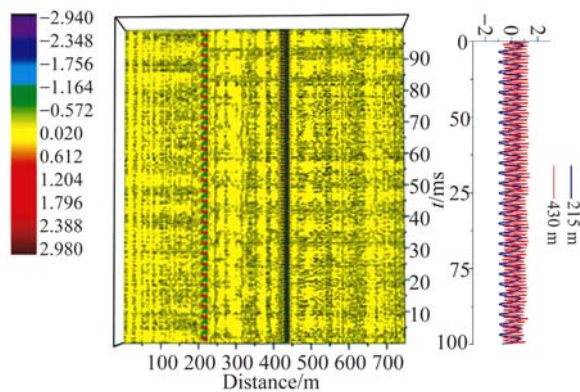


图 6 DAS 系统解调时域图

Fig. 6 Time domain demodulation diagram of DAS system

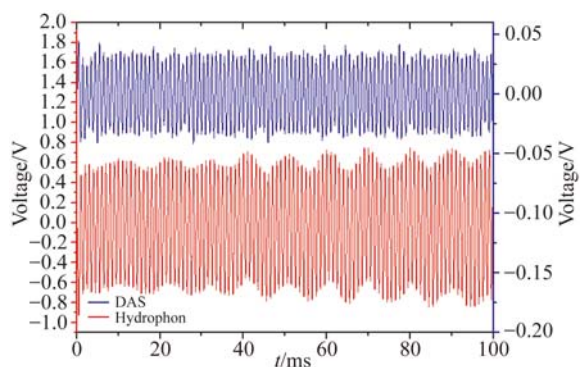


图 7 解调声波信号的时域波形图

Fig. 7 Time domain waveform diagram of demodulated acoustic wave signal

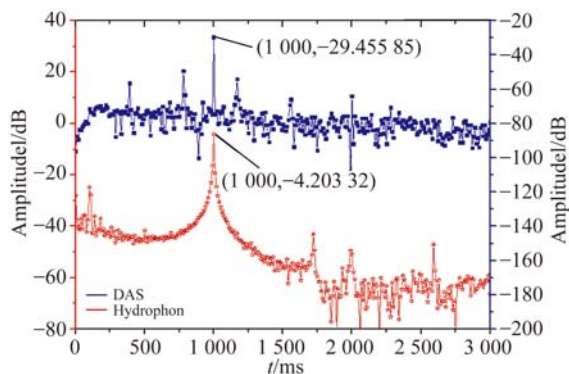


图 8 解调声波信号的频域图

Fig. 8 Frequency domain diagram of demodulated acoustic wave signal

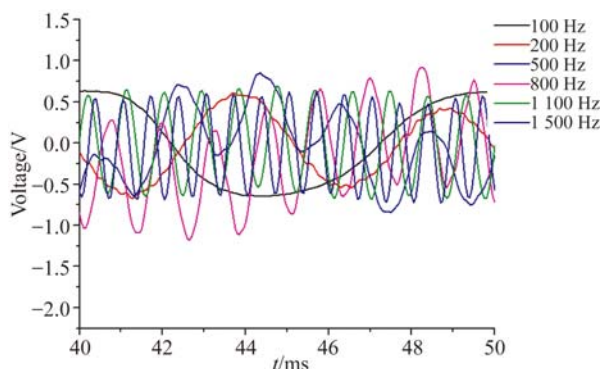


图 9 不同频率下解调声波信号的时域波形图

Fig. 9 Time domain waveform diagram of demodulated acoustic wave signal at different frequencies

表 1 不同频率下的声波相位灵敏度

Tab. 1 Acoustic phase sensitivities at different frequencies

Frequency/Hz	Voltage/V	Acoustic phase sensitivity/dB
100	0.60	-149.0
200	0.62	-148.8
500	0.58	-149.3
800	0.67	-148.1
1 100	0.62	-148.8
1 500	0.65	-148.4

5 结 论

本文提出了基于后向瑞利散射信号的空间差分干涉技术的 DAS 系统,相邻空间段内的瑞利散射光的偏振态及光强近似相同,提高解调信号的信噪比,采用 3×3 耦合器解调技术解调出相位信息,实现声波信号的测量。然后,搭建了一套基于 DAS 技术的水下声波测量系统,分别采用水下扬声器和压电陶瓷作为声波信号的驱动源,DAS 系统成功地完成了不同位置、不同频率、不同幅值的多个声源的实时准确定位及不同声波源的幅值、频率等信息的解调。实验结果表明,该系统在 1 kHz 情况下的水下声压相位灵敏度为 -148.8 dB (re rad/ μ Pa),100~1 500 Hz 频率的频响平坦度在 1.2 dB 之内。

参考文献:

- [1] 吴入军, 郑百林, 贺鹏飞. 埋入式光纤布拉格光栅传感器封装结构对测量应变的影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1):24-30.
WU R J, ZHENG B L, HE P F. Influence of encapsulation structures for embedded fiber-optic Bragg grating sensors on strain measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1):24-30. (in Chinese)
- [2] 唐波, 黄俊斌, 顾宏灿. 光纤光栅水听器探头封装技术研究进展[J]. 光通信技术, 2017(1):45-48.
TANG B, HUANG J B, GU H C. Research progress of fiber grating hydrophone probe encapsulation technology [J]. *Optical Communication Technology*, 2017(1):45-48. (in Chinese)
- [3] 赛耀樟, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于光纤光栅阵列和 MVDR 算法的声发射定位[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11):3012-3017.
SAI Y ZH, JIANG M SH, SUI Q M, *et al.*. Acoustic emission location based on FBG array and MVDR algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(11):3012-3017. (in Chinese)
- [4] VILLALBA S, CASAS J R. Application of optical fiber distributed sensing to health monitoring of concrete structures [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 39(1-2):441-451.
- [5] 曹玉龙, 杨飞, 徐丹, 等. 基于 3×3 迈克耳孙干涉仪的分布式光纤振动传感器[J]. 中国激光, 2016, 43(10):1010001.
CAO Y L, YANG F, XU D, *et al.*. Disturbed fiber vibration sensor based on 3×3 Michelson interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10):1010001. (in Chinese)
- [6] WEI P, SHAN X K, SUN X H. Frequency response of distributed fiber-optic vibration sensor based on nonbalanced Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(1):47-51.
- [7] WADA K, NARUI H, YAMAMOTO D, *et al.*. Balanced polarization maintaining fiber Sagnac interferometer vibration sensor [J]. *Optics Express*, 2011, 19(22):21467-21474.
- [8] RUSSELL S J, BRADY K R C, DAKIN J P. Real-time location of multiple time-varying strain disturbances, acting over a 40-km fiber section, using a novel dual-Sagnac interferometer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(2):205-213.
- [9] KONDRAT M, SZUSTAKOWSKI M, PALKA N, *et al.*. A Sagnac-Michelson fibre optic interferometer: signal processing for disturbance localization [J]. *Opto-Electronics Review*, 2007, 15(3):127-132.
- [10] BAO X Y, CHEN L. Recent progress in distributed fiber optic sensors [J]. *Sensors*, 2012, 12(7):8601-8639.
- [11] ZHANG C X, ZHONG X, LI L J, *et al.*. Long-distance intrusion sensor based on phase sensitivity optical time domain reflectometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2):742-746.
- [12] DING X X, ZHANG X, WANG H B, *et al.*. Influences of modulation frequency on dynamic performance of vibration sensor based on Φ -OTDR [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1):210-214.
- [13] HUI X N, ZHENG S L, ZHOU J H, *et al.*. Electro-optic modulator feedback control in phase-sensitive optical time-domain reflectometer distributed sensor [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(35):8581-8585.
- [14] PENG F, WU H, JIA X H, *et al.*. Ultra-long high-sensitivity Φ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines [J]. *Optics Express*, 2014, 22(11):13804-13810.
- [15] KOYAMADA Y, IMAHAMA M, KUBOTA K, *et al.*. Fiber-optic distributed strain and temperature sensing with very high measurand resolution over long range using coherent OTDR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(9):1142-1146.
- [16] NAKAZAWA M. Rayleigh backscattering theory for single-mode optical fibers [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1983, 73(9):1175-1180.
- [17] JUŠKAITIS R, MAMEDOV A M, POTAPOV V T, *et al.*. Interferometry with Rayleigh backscattering in a single-mode optical fiber [J]. *Optics Letters*, 1994, 19(3):225-227.
- [18] SHANG Y, YANG Y H, WANG C, *et al.*. Optical fiber distributed acoustic sensing based on the self-interference of Rayleigh backscattering [J]. *Measurement*, 2016, 79:222-227.
- [19] SHANG Y, YANG Y H, WANG C, *et al.*. Study on demodulated signal distribution and acoustic pressure phase sensitivity of a self-interfered distributed acoustic sensing system [J]. *Measurement Science and*

Technology, 2016, 27(6):065201.

- [20] 曾周末, 刘芳, 封皓, 等. 基于 3×3 耦合器的双马赫-曾德尔干涉仪数字化相位解调[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6):1410-1417.

ZENG ZH M, LIU F, FENG H, *et al.*. Digitalized demodulation based on 3×3 coupler for dual Mach-Zehnder fiber interferometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6):1410-1417. (in Chinese)

作者简介:



董 杰(1979—),男,山东莱芜人,硕士,副教授,2001年、2006年于山东大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光纤传感、光学设计,数据处理、计算机控制等方面的研究。E-mail:dj@sdyu.edu.cn