

激光与光电子学进展

用于石油物探的分布式光纤声波地震检波器

倪家升^{1,2*}, 刘铁根¹, 尚盈², 赵燕杰³

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

²齐鲁工业大学(山东省科学院)激光研究所, 山东 济南 250014;

³山东建筑大学理学院, 山东 济南 250101

摘要 地震检波器是石油勘探中必不可少的工具, 主要被用于地震波采集以获取地层信息, 进而实现油藏勘察以及压裂采油技术的监控。研究了分布式光纤声波传感(DAS)系统及其在石油物探中的应用, 深入分析了DAS技术的干涉式解调原理、算法和参数测试。此外, 还进行了地面物探实验, 通过外场实验获取了大量地震波信息, 绘制出了清晰的地震剖面图, 并对DAS的性能和测试数据进行了详细分析。

关键词 光纤光学; 光纤传感; 石油物探; 分布式声波传感器; 检波器

中图分类号 TP212.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0306006

Distributed Fiber-Optic Acoustic Seismic Geophone for Petroleum Geology Exploration

Ni Jiasheng^{1,2*}, Liu Tiegeng¹, Shang Ying², Zhao Yanjie³

¹School of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Laser Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan, Shandong 250014, China;

³School of Science, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China

Abstract In petroleum exploration, a seismic geophone is an indispensable tool. It is primarily used to collect seismic wave data, obtain formation data, and monitor reservoir exploration and fracturing oil recovery technology. This study investigates distributed fiber-optic acoustic sensing (DAS) system and its application in petroleum geology exploration, and deeply analyzes the interferometric demodulation principle, the algorithm, and the parameter test of DAS technology. Furthermore, a ground geophysical prospecting test is conducted, and a clear seismic section image is generated, as well as the performance and the test data of DAS are analyzed in detail.

Key words fiber optics; optics sensors; petroleum geology exploration; distributed acoustic sensor; geophone

1 引言

声波物探技术是一种被广泛应用的传感技术, 主要是对物体或结构中传播的声波信号进行检测

和监测, 通过实时采集快速变化的声波振动相位和振幅分析感知物体内部结构等不易被直接观测的信息。在石油物探领域, 用震源向地下发射地震波(激励), 当地震波遇到不同界面(地质层)时会产生

收稿日期: 2021-02-18; 修回日期: 2021-04-19; 录用日期: 2021-05-19

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U2006216)、山东省重点研发计划(公益类)(2019GSF111011)、山东省自然科学基金(ZR2020MF109)

通信作者: njsh51@163.com

声波/地震波反射信号,利用地震波检波器/声波探测器接收后可判断出地层分布以及石油储藏信息,实现地震波的物探探测。光纤传感器具有频带宽、耐高温、灵敏度高、无电磁干扰等突出的技术优势^[1-2]。其中,分布式光纤声波传感(DAS)系统直接利用光纤作为传感器,通过检测光纤中的后向瑞利散射信号实现声波信号检测,几乎可以同时检测出光纤上所有的声波振动信息,是目前最先进的光纤传感技术之一。在 DAS 系统中,光纤不仅被作为信号传输介质,同时也是传感感知器件,真正实现了传输与感知的一体化融合。

分布式光纤声波/振动探测技术主要是基于光纤背向瑞利散射的相位敏感光时域反射计(Φ -OTDR)^[3-4]实现。 Φ -OTDR 自 Taylor 等^[5]提出以来,逐渐成为学术研究的热点,Juarez 等^[6-8]分别在扩展监测距离、空间分辨率和频率响应范围方面提升和改进了 Φ -OTDR 的性能。Masoudi 等^[9]利用马赫-曾德尔干涉仪(MZI)和 Φ -OTDR 技术成功测量了 1500 Hz 以上的动态应变信号。Wang 等^[10]开发了一种干涉型分布式光纤振动传感器,可实现多点扰动监测。Zhou 等^[11]提出了一种可同时监测应变和振动的 Φ -OTDR 方案,在 9 km 长的传感光纤上,通过激光扫描获得了 2 m 的空间分辨率和 10 ns 的应变测试精度。Martins 等^[12]利用一阶双向拉曼放大技术将 Φ -OTDR 系统的传感距离扩展到 125 km (空间分辨率为 10 m)。Peng 等^[13]设计了基于 Φ -OTDR 和多阶拉曼放大技术的分布式光纤传感系统,实现了超远距离的分布式监测,最大传感距离达到 131.5 km。基于 Φ -OTDR 实现的地震物探具有布放简单、一次获取数据量大等优点,同时可以解决现场供电、施工等难题,得到了人们的广泛研究。QinetiQ、Opta Sense、Silixa、Qorex 和 Ziebel 等公司对 DAS 技术也开展了相关研究和市场开发,与壳牌、Weatherford 等石油和测井公司的合作在石油探测设备开发上取得了巨大进展。如壳牌公司利用光纤 DAS 在荷兰 Schoonebek 实现了三分量垂直地震剖面(VSP)探测,得到了完整的纵波和横波反射信号,Weatherford 公司采用光纤 DAS 技术测量油气含水率。山东科学院激光研究所在胜利油田营口东风港采油区进行了多次地震实验^[14-15],得到了大量的地震剖面有效数据。

综上所述,DAS 利用光纤本身作为传感器进行信号采集,且能安装布设在油井或直接埋在地下、

海底进行地震成像探测,在井中地震勘探、油气藏动态监测和微地震监测等方面的应用发展迅速,凭借高密度、全井段、高效、低成本、耐高温高压等优势,成为贯穿油井全生命周期中一项重要的新兴油藏监测技术,具有巨大的市场空间和良好的发展潜力。但目前大部分研究仍然停留在实验室样机阶段,对于其在油田物探中的应用还需要开展大量的测试实验,以改进相关技术,进而推动 DAS 技术在油田领域的应用。本文针对石油物探对分布式地震检波器的技术需求,研究了分布式光纤声波传感器的技术原理和方案,并搭建实验系统开展了现场应用测试。

2 基本原理

声波可被认为是一种压力波,由于光纤的弹光效应^[16],暴露在声场中的光纤折射率或其他参数会受到声压的影响,当光束沿光纤传输时,激光的相位可表示为

$$\Phi = 2\pi n_l L / \lambda, \quad (1)$$

式中, L 为光在光纤中的传输距离, n_l 为光纤的折射率, λ 为光的波长。当外部声压作用在光纤上时会导致光的相位发生变化,相位变化量可表示为

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi n_l}{\lambda} \cdot \Delta L + \frac{2\pi L}{\lambda} \cdot \Delta n_l, \quad (2)$$

式中, ΔL 为光纤的长度变化量。(2)式中的第一项为外部声压引起的应变效应,第二项为光弹性效应引起的传播常数变化导致的相移。当声压 P 作用在光纤上时,光纤两个方向上的折射率变化可表示为

$$\Delta n_1 = \Delta n_2 = \frac{n_l^3 P}{2E} [(1-\mu)p_{11} + (1-3\mu)p_{12}], \quad (3)$$

式中, p_{11} 、 p_{12} 为光弹系数张量矩阵的参数, μ 为光纤的泊松比, E 为光纤的杨氏模量^[17]。光沿光纤轴向传播时的折射率变化量 $\Delta n_l = \Delta n_1 = \Delta n_2$,轴向应变 $S_3 = 2\mu P/E$,光纤的长度变化量 $\Delta L = 2L\mu P/E$,此外

$$\Delta\Phi = \frac{\pi L P}{\lambda E} [n_l^3(1-\mu)p_{11} + n_l^3(1-3\mu)p_{12} + 4n_l\mu]. \quad (4)$$

声压 P 可通过相位变化测量,对于普通石英光纤, $p_{11}=0.13$, $p_{12}=0.28$,光纤的折射率 $n=1.46$, $E=7.2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $\mu=0.17$,激光波长 $\lambda=1550 \text{ nm}$,光纤单位长度上的相位变化量 $\Delta\Phi_L$ 与声压 P 之间的关系可表示为

$$\Delta\Phi_L = \Delta\Phi/L = 4.942 \times 10^{-5} P. \quad (5)$$

与 OTDR^[18] 技术类似,DAS 通过在光纤内注入

激光脉冲获得声学特征发生的位置信息,其原理如图 1 所示。分布式反馈光纤激光器产生波长为 1550 nm 的连续激光,通过声光调制器(AOM)将连续激光转换成宽度约为 10 ns 的脉冲激光。脉冲激光从环形器的一个端口输入传感光缆,光缆中的后向瑞利散射光反射回来,并从环形器另一个端口输出。由于后向瑞利散射光的能量非常弱,无法直接探测,因此需要用光纤放大器(OFA)进行放大,以提高有效探测信号的信噪比。OFA 部分选用掺铒光纤放大器(EDFA)进行放大,会引入自发辐射噪

声,因此,需要用滤波器消除引入的自发辐射光噪声。图 1 中的耦合器、法拉第旋转镜(FRM-1、FRM-2)以及连接耦合器与 FRM 之间的光纤共同构成迈克耳孙干涉仪,臂长差(两个 FRM 到耦合器的光程差)为 d 。后向瑞利散射光信号注入到迈克耳孙干涉仪后,被耦合器分为两束光,分别到达各自光路末端的 FRM 后原路返回,当光再次到达耦合器时形成干涉。后向瑞利散射光 $e_r(t)$ 经迈克耳孙干涉仪形成的干涉光被耦合器分离成两束激光输出,分别到达光电探测器 PD1、PD2。

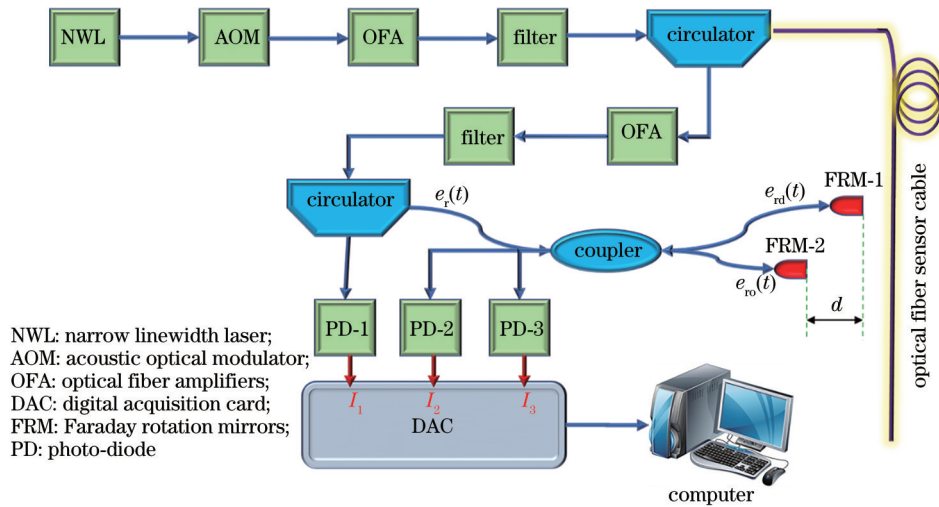


图 1 DAS 的原理图

Fig. 1 Principal diagram of the DAS

通过干涉法进行相位解调时(图 1 中典型的 3×3 无源解调算法采用 3×3 耦合器^[19]),利用 PD1、PD2、PD3 和数字采集卡实现光电转换和采集。 I_1 、 I_2 、 I_3 分别为三路信号的强度,用算法对三路信号处理后能得到某一位置相位的扰动信息 $\phi(t)$,可表示为

$$I_k = D + I_0 \cos [\phi(t) - (k - 1) \times (2\pi/3)], \quad k = 1, 2, 3. \quad (6)$$

可以发现, $\phi(t)$ 中包含了因光弹效应引起的分布式声压响应,利用光强相干相位解调可实现分布式声波测量。用振动台(Brüel & Kjær Vibration Co, Ltd)和标准水听器探头(中国船舶第 715 研究所研制)建立了校准测量系统,以测试该系统的频率响应和灵敏度。传感光纤缠绕在金属柱上并将其固定在振动台上,设置的加速度为 150 mm/s^2 , 振动频率变化范围为 $0 \sim 1 \text{ kHz}$, 图 2 为传感系统的频率响应测试曲线图(用 100 Hz 附近系统探测到同频响应信号强度作为参考值进行归一化)。可以发现,

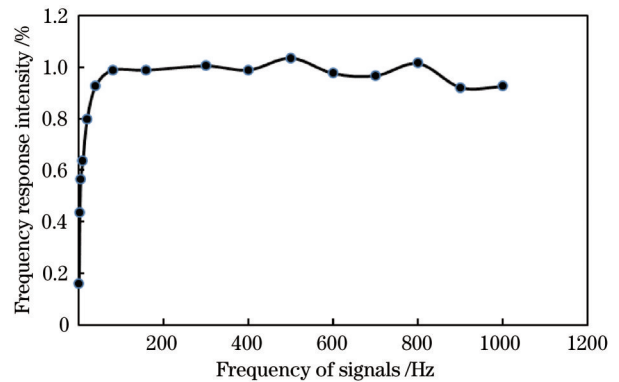


图 2 DAS 系统的频率响应图

Fig. 2 Frequency response of the DAS system

频率响应在 1 Hz 至 1 kHz 范围内的平坦度良好,基本满足绝大多数石油物探的实际应用要求。

图 3 为 DAS 的加速度响应测试曲线,可以发现,部分测试点偏离拟合曲线,原因是振动台震源误差以及振动台与传感器固定组合后产生失耦合、测试误差,但整体响应曲线的线性度仍能达到 0.988,这表明传感系统对加速度的线性响应非常好。

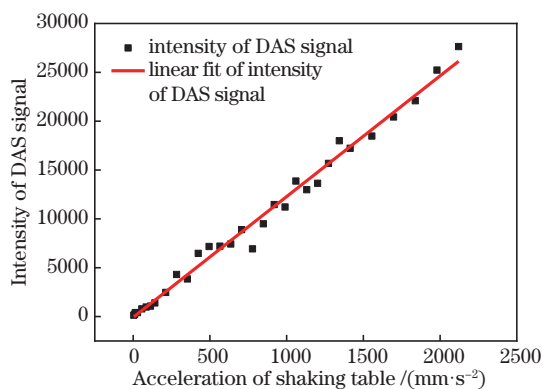


图 3 DAS加速度的测试标定曲线

Fig. 3 Test calibration curve of the DAS acceleration

为了准确测量传感器的灵敏度以及最小信号探测极限,在水槽中搭建水声信号的测试装置,水槽底部固定一个由函数发生器驱动的 200 Hz 正弦信号水下扬声器对系统进行测试,标准水听器探头及采集系统用于校正参考,光纤盘绕成一个光纤环(长为 10 m),以消除声压幅度的不均匀性。将光纤环和标准水听器放置在距离水下扬声器约 5 cm 处,使光纤环与标准水听器的位置尽量一致。水听器信号用于将测量相位与声压关联起来,通过标准水听器可以测量不同声强下的声压幅值,进而计算出本系统的相压灵敏度。将声压强度逐渐降低到无法分辨的程度,即可得到系统的最小分辨率。实验结果表明,系统的极限分辨率约为 30 mPa@200 Hz。

将末端光纤(长度为 1 m)缠绕在压电陶瓷上,通过压电陶瓷的张弛检验系统是否能够探测到有效信号,验证系统的最大测量距离,结果如图 4 所示。可以发现,当远离系统 65 km 位置处的光纤缠

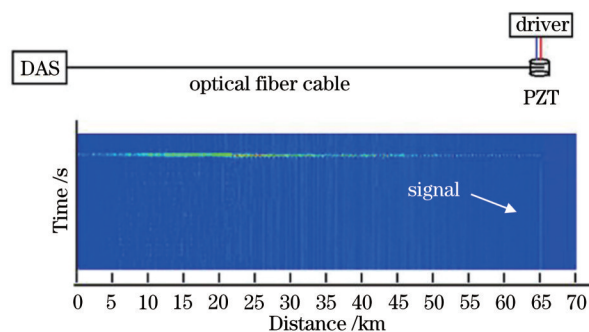


图 4 观测距离测试图

Fig. 4 Test chart of the observation distance

绕在压电陶瓷上时,传感系统仍然能够清晰地获取响应信号。考虑到实际应用中光缆的损耗,该探测能力也完全符合当前石油深部地震勘探及开采的应用要求。

3 现场测试与讨论

现场实验选址位于山东省东营胜利油田某石油蕴藏区块,考虑到光缆为非地理方式布置,在采集地震波时存在信号严重衰减问题,将长约 2000 m 的光缆用金属锚锥固定在地面,进一步增强光缆与地面之间的耦合传导效果,如图 5 所示。锚锥固定点间隔设计为 2.5 m,全光缆需要约 800 支锚锥。本次石油地震勘探测试实验采用震源(4 kg 的炸药)产生地震波,震源依次引爆时,DAS 同时获得反射波信号。根据石油物探数据规范要求,DAS 测量得到的地震波数据格式化为 SEG-D(国际应用地球物理学家协会、勘探地球物理学家协会推荐的标准格式)。

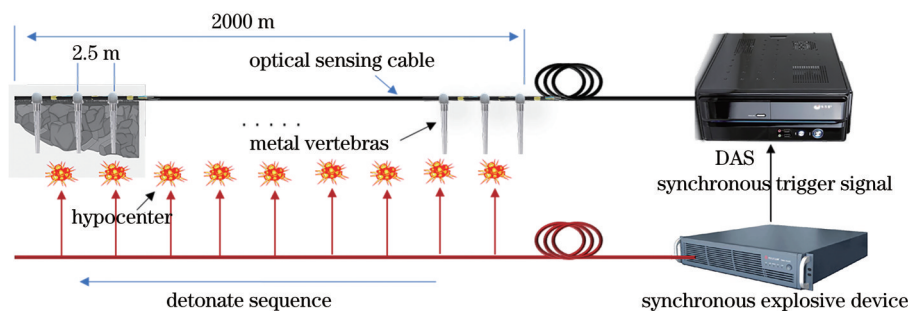


图 5 物探实验的现场布置图

Fig. 5 On-site layout of the geology exploration experiment

图 6 为实验获取的相关区块地震剖面数据图,可以明显观察到清晰的地质结构,表明系统能较好地捕获地震波反射信号。从地震剖面图中的初至波信号排列来看,其相位一致性较好,深层反射波

也能较好地对应和刻画出地层结构。但从图 6 中仍然能发现一些不足,如各测试点的信号强度差异非常大,这表明传感器的灵敏度一致性不好。其中,虚线框中的信息为同一反射界面,但沿横坐标(地

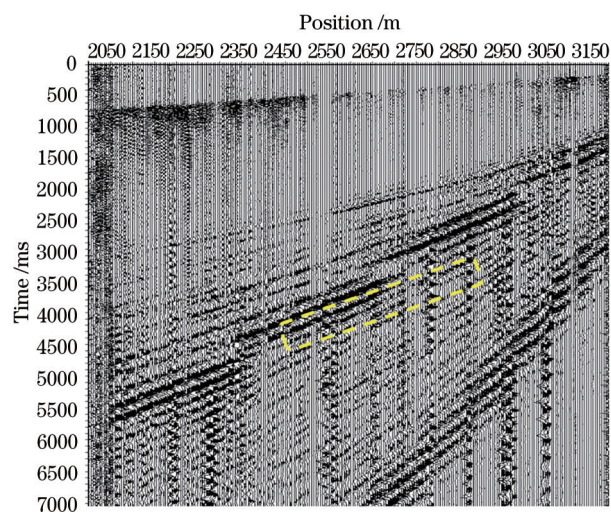


图 6 地震剖面图(中国,山东省东营市胜利油田)

Fig. 6 Seismic section restoration(Shengli Oil Field, Dongying, Shandong Province, China)

面位置)变化获取的信号强度不同,原因是地面实验没有将光缆埋入地层,部分光缆悬空在地面,与地震波信号的耦合效率下降,这些问题在未来地面物探时必须考虑和解决。此外,在井中测试时该问题会得到极大改善,但仍需要考虑光缆与井壁的推靠耦合等问题。

4 结 论

深部地震勘探和资源开发依赖于更先进的地震仪,耐高温高压、宽频带、高灵敏光纤地震检波器是下一代地震检波器技术。分布式光纤声波检测技术只需使用一根光缆就可以采集到丰富的信息,能解决施工中遇到的众多难题,如传统地震实验通常需要 10 m 的间隔甚至更近的传感器头提高工作效果,以防止丢失大量地震波采样信息,使现场施工的工作量很大。而 DAS 直接采用分布式测量技术,单根光纤电缆可以同时实现数千道甚至上万道数据的一次性测量,在工程应用中更简便。介绍了一种用于地震物探的光纤分布式声波传感器,并通过实验验证了该传感器实现分布式地震探测的可行性,获得了清晰完整的地层剖面图。但实验仅完成了地面验证,下一步还考虑将传感光缆下放到井中,有望在高分辨井中地震、VSP 等领域实现突破。

参 考 文 献

[1] Yuan L B. Multi-core fiber characteristics and its sensing applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170612.

苑立波. 多芯光纤特性及其传感应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170612.

[2] Fan Y Y, Shi W H. Numerical studied on photonic crystal fiber biosensors based on surface plasmon resonance[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(21): 2106003.
范雨艳, 施伟华. 基于 SPR 的光子晶体光纤生物传感的数值研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(21): 2106003.

[3] Ma H Y, Wang X X, Ma F, et al. Research progress of Φ -OTDR distributed optical fiber acoustic sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 130005.
马皓钰, 王夏霄, 马福, 等. Φ -OTDR 型分布式光纤声波传感器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 130005.

[4] Cai H W, Ye Q, Wang Z Y, et al. Distributed optical fiber acoustic sensing technology based on coherent Rayleigh scattering[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 050001.
蔡海文, 叶青, 王照勇, 等. 基于相干瑞利散射的分布式光纤声波传感技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 050001.

[5] Taylor H F, Lee C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US5194847[P]. 1993-03-16.

[6] Juarez J C, Maier E W, Choi K N, et al. Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(6): 2081-2087.

[7] Xie K L, Rao Y J, Ran Z L. Distributed optical fiber sensing system based of Rayleigh scattering light Φ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(3): 569-572.

[8] Qin Z G, Chen L, Bao X Y. Continuous wavelet transform for non-stationary vibration detection with phase-OTDR[J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20459-20465.

[9] Masoudi A, Belal M, Newson T P. A distributed optical fibre dynamic strain sensor based on phase-OTDR[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(8): 085204.

[10] Wang H, Sun Q Z, Li X L, et al. Progress in optical fiber interferometer based distributed vibration sensing technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 020004.

[11] Zhou L, Wang F, Wang X C, et al. Distributed strain and vibration sensing system based on phase-sensitive OTDR[J]. *IEEE Photonics Technology*

- Letters, 2015, 27(17): 1884-1887.
- [12] Martins H F, Martín-López S, Corredera P, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometer assisted by first-order Raman amplification for distributed vibration sensing over >100 km[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(8): 1510-1518.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Shang Y, Yang Y H, Wang C, et al. Quasi-distributed acoustic sensing based on identical low-reflective fiber Bragg gratings[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(1): 015202.
- [16] Liu D M, Xiang Q, Huang X D. Optical fiber of the light[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 187-190.
刘德明, 向清, 黄德修. 光纤光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 187-190.
- [17] Sun Q Z. Study on the distributed fiber-optic sensing and information processing technology and its applications[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008: 18-19.
孙琪真. 分布式光纤传感与信息处理技术的研究及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008: 18-19.
- [18] Nakazawa M. Rayleigh backscattering theory for single-mode optical fibers[J]. Journal of the Optical Society of America, 1983, 73(9): 1175-1180.
- [19] Todd M D, Seaver M, Bucholtz F. Improved, operationally-passive interferometric demodulation method using 3×3 coupler[J]. Electronics Letters, 2002, 38(15): 784-786.