

选择性平均的 φ -OTDR 分布式光纤扰动传感系统 阈值算法

王 鹏¹, 娄淑琴¹, 梁 生², 张 颜¹

(1. 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044; 2. 北京交通大学 理学院, 北京 100044)

摘要: 阈值的准确设定是有效降低 φ -OTDR 分布式光纤扰动传感系统误报和漏报率的关键。针对该问题, 提出了一种基于选择性平均的 φ -OTDR 分布式光纤扰动传感系统阈值算法, 采用相关差值预挑选的方式确定信号模板, 进行阈值模板匹配。理论和实验研究表明: 提出的选择性平均阈值算法, 能够更有效设定阈值, 提高信噪比, 降低 φ -OTDR 分布式光纤扰动传感系统的误报和漏报率, 与直接平均和移动平均阈值算法相比, 所提出的选择性平均阈值算法将误报率分别降低了 5% 和 3%, 漏报率均降低了 2%; 信噪比分别提升了 2.55 dB、1.1 dB。所提出的算法有助于提高 φ -OTDR 分布式光纤扰动传感系统在实际应用中可靠性。

关键词: 选择性平均算法; φ -OTDR; 分布式光纤扰动传感系统; 阈值; 模板匹配

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0322003

Selective average based threshold algorithm for φ -OTDR distributed fiber-optic sensing system

Wang Peng¹, Lou Shuqin¹, Liang Sheng², Zhang Yan¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

2. School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Accurate threshold is the key factor for reducing both of missing and nuisance alarm rates, which is essential for the φ -OTDR distributed fiber-optic sensing system. In order to solve this problem effectively, the algorithm based on the selective average was proposed. During this proposed algorithm, a pre-selection scheme was achieved using the correlation difference method to determine a signal template. Then, the match of threshold template can be realized. Theoretical and experimental results show that by the proposed algorithm the threshold can be obtained to decrease the missing and nuisance alarm rates, and improve the signal-to-noise ratio (SNR) of the φ -OTDR distributed fiber optic sensing system. In comparison with current direct and moving average algorithm, the missing alarm rate is decreased by 2%, and the nuisance alarm rate is decreased by 5% and 3%. What's more, the SNR is increased by 2.55 dB and 1.1 dB, respectively. In conclusion, the proposed algorithm was also useful to improve the real-time reliability of the system for the practical applications.

Key words: selective average algorithm; φ -OTDR; fiber distributed disturbance sensing system; threshold; template matching

收稿日期: 2015-07-05; 修订日期: 2015-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(61177082, 61205074)

作者简介: 王鹏(1989-), 男, 硕士生, 主要从事光纤传感方面的研究。Email: 13120029@bjtu.edu.cn

导师简介: 娄淑琴(1965-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光纤传感、全光网络关键技术方面的研究。Email: shqlou@bjtu.edu.cn

0 引言

近年来,基于相位敏感光时域反射仪(φ -OTDR)的分布式光纤传感系统(DOFS) 凭借其灵敏度高、抗电磁干扰、长距离监测、无需外场供电、施工简单、仅用一根光纤以及定位精度稳定等诸多技术优势,在在周界安防、油气管道、通信光缆监测等诸多领域得到了广泛的研究和应用^[1-8]。

阈值的准确设定是有效降低 φ -OTDR 分布式光纤扰动传感系统漏报和误报的关键。目前, φ -OTDR 阈值算法主要有基于静态阈值的直接平均算法和动态阈值的移动平均算法。静态阈值的直接平均算法,阈值判定由传感光纤长度及累加瑞利散射光强曲线周期数决定。但是在实际扰动环境下采集阈值时,信噪比较低,易造成局部阈值的失真,导致误报或漏报。动态阈值的移动平均算法,需要设定移动平均次数,动态采集阈值^[9]。如果平均次数设置过小,信噪比较低,平均次数设置过大,在长距离应用中,多点同时发生扰动时,运算量大、实时性和适应性差。

文中针对 φ -OTDR 分布式光纤扰动传感系统阈值算法问题,通过采用阈值模板匹配^[2]的方式,首次提出了一种基于选择性平均的阈值采集算法。研究表明:提出的选择性平均算法,可有效提高信噪比,降低误报和漏报率。

1 实验系统原理

φ -OTDR 分布式光纤扰动传感系统原理如图 1 所示,系统包括超窄线宽激光器(Laser Source, LS),声光调制器(Acoustic-Optic Modulator, AOM),掺铒光纤放大器(Erbium-doped Optical Fiber Amplifier, EDFA),环形器(Circulator),传感光纤(Sensing fiber),光电探测器(Photo-Detector, PD),模数转换器(Analog-to-Digital, AD),数据采集卡(Data Acquisition Card, DAQ)和上位机(Personal Computer, PC)等。

与传统的光时域反射仪(OTDR)一样,激光源脉冲,经声(电)光调制器调制,EDFA 放大后,通过环形器注入到分布式传感光纤中,并用光电探测器实时探测后向瑞利散射光强,经采集卡采集散射信号之后,交由 PC 进行数据处理。与传统的 OTDR 相比, φ -OTDR 的不同之处在于: φ -OTDR 使用超窄线宽

激光光源,可以响应相位调制;由于注入光纤中的光具有强相干性,系统输出是后向瑞利散射光干涉后的光强^[9-10]。

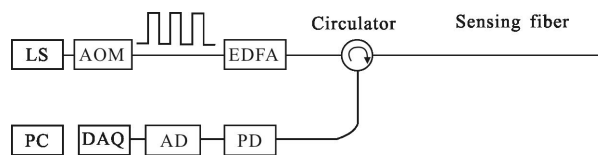


图 1 系统原理示意图

Fig.1 Principle of φ -OTDR

当传感光纤发生扰动时,由于弹光效应,相应位置传感光纤的折射率、偏振态、长度将发生变化,导致光相位的变化。因为入侵位置的散射光传输到探测器经历的是周期性的相位变化,因此,最终相位的变化,由于干涉作用将导致光强发生变化^[3]。将 φ -OTDR 分布式光纤传感系统不同时刻的后向瑞利散射光强曲线做差值,通过差值曲线上光强发生剧烈变化的时间位置 t ,通过公式(1)计算出扰动发生的空间位置 z 。

$$z = \frac{ct}{2n} \quad (1)$$

式中: c 为真空中的光速; n 为折射率; t 为系统发出脉冲与探测器接收到后向瑞利散射信号之间的时间差。

阈值的设定是 φ -OTDR 分布式光纤扰动传感系统检测外界入侵扰动进行预警的关键。当有外界扰动出现时,系统输出的实时瑞利散射光强差值大于设定的阈值,系统将对扰动出现进行报警,并给出产生扰动发生的位置 z 。阈值设定过低,系统对外界环境量引起的信号变化敏感度增加,导致误报率升高;而阈值设定过高,系统将对一些较弱外界入侵扰动出现漏报。因此,准确的阈值设定对降低 φ -OTDR 分布式光纤扰动传感系统误报和漏报率,提高系统性能至关重要。

2 选择性平均算法

在阈值采集时,传感光纤一旦受到外界环境的扰动,导致瑞利散射光强抖动明显,阈值失真,信噪比降低,误报和漏报率提升。目前 φ -OTDR 分布式传感系统的阈值算法主要基于静态阈值的直接平均和动态阈值的移动平均两种算法。文中针对建立 φ -

OTDR 分布式传感系统, 提出了采用选择性平均算法进行系统的阈值设定。选择性平均算法是一种通过模板匹配的方式剔除部分受扰动的瑞利散射曲线进行平均的方法, 具体的算法流程如图 2 所示。

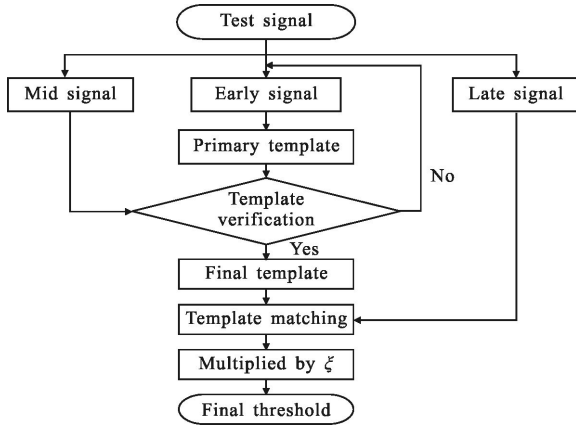


图 2 选择性平均算法流程图
Fig.2 Flow chart of selective average algorithm

(1) 将待测信号, 按采集时间平均分为初期信号、中期信号及后期信号。

(2) 将初期信号进行直接平均处理, 获得的平均信号结果作为初级模板。

(3) 初级模板验证。计算中期信号与初级模板之间的相似系数, 判断初级模板是否合格。相似系数代表二者之间的相似程度, 定义为:

$$\gamma = 1 - \delta \quad (2)$$

式中: δ 为差值系数, 反映了当前信号与模板信号在各个时间段上的形状差异, 表示为:

$$\delta = \frac{\left| \sum_{k=0}^{N-1} T_k T_k - \sum_{k=0}^{N-1} T_k X_k \right|}{\sum_{k=0}^{N-1} T_k T_k} \quad 0 \leq \delta \leq 1 \quad (3)$$

式中: T_k 为模板信号; X_k 为待检测信号。通过相关差值法 (correlation difference method) 估计模板信号的自相关函数与模板与待检测信号的互相关函数之间的相似度来实现模板匹配。在信号匹配过程中, 相关差值法对信号的幅度变化灵敏度非常高。经相关差值法验证后, 初级模板合格, 进行下一步, 否则, 舍弃初级信号, 重复步骤(1)。

(4) 模板匹配。计算后期信号与初级模板之间的相似系数, 识别并剔除差值系数较大的周期波形, 将保留下来的周期数组进行直接平均, 得到初期采集

阈值。

阈值的准确设定是有效降低 φ -OTDR 分布式光纤扰动传感系统漏报和误报的关键。因为得到的采集阈值是瑞利散射周期信号直接平均的结果, 且传感光纤对扰动信号反应敏感, 为了防止出现误报现象, 得到更加复合实际应用的阈值, 最终阈值定义为:

$$g = \xi \times \gamma_{\text{mean}} \quad 1 \leq \xi \leq 2.5 \quad (4)$$

式中: γ_{mean} 为初期采集阈值; ξ 为强度因子, 可以根据实际环境进行调整。

3 实验

实验采用的超窄线宽半导体激光器, 输出波长为 1 550 nm, 输出功率为 13 μ W, 线宽为 10 kHz, 声光调制器调制, 脉冲宽度约为 486 ns (对应的空间分辨率约为 50 m), 采集卡采样频率为 4 MHz。传感光纤的长度为 25.05 km, 每 50 m 为一个防区, 共 501 个防区。

3.1 初级模板实验验证

在实验室静态环境下, 采集 120 min 的各个防区阈值数据。图 3 给出的是将其中前 40 min 的初期信号进行直接平均算法处理后, 得到的不同防区的归一化瑞利散射光强, 如图 3 所示, 并将其作为阈值匹配的初级模板。从图 3 中可以看出, 瑞利散射光强整体随着传感光纤长度的增加而降低, 且信噪比较低, 这主要是由于传输损耗导致的光强下降。

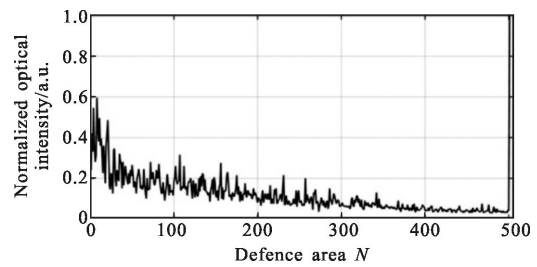


图 3 初级模板
Fig.3 Primary template

3.2 初级模板验证实验

在初级模板验证之前, 将中期 40 min 的采集信号每隔 48 s 采集的数据平均一次, 共计 50 组数据。计算初级模板与 50 组数据之间的相关运算差值系数, 结果如图 4 所示。从图 4 显示的结果可以看出, 差值系数 δ 均小于 0.4。为获取更加优化的阈值匹配的最终模板, 以 $\delta=0.35$ 为上限, 将符合要求的数组

进行直接平均, 结果作为阈值匹配的最终模板, 如图 5 所示。从图 5 显示的结果可以看出, 瑞利散射信号的脉冲抖动现象明显减弱, 这是由于相关差值运算剔除差值系数较大数组的结果。

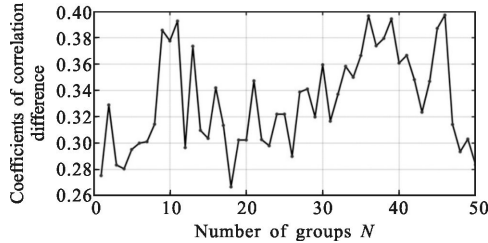


图 4 无扰动时的相关差值系数

Fig.4 Coefficients of correlation difference when undisturbed

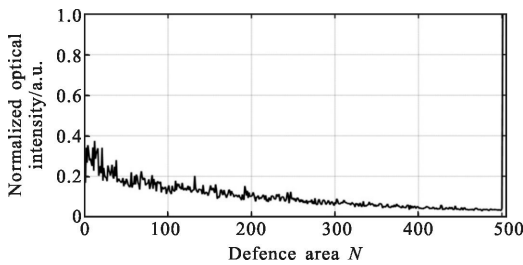


图 5 最终模板

Fig.5 Final template

而在实际应用环境下, 传感光纤铺设距离较长, 在阈值采集过程中不可避免受到外界环境的干扰。图 6 给出的是分别在 1.85 km、6.2 km、13.55 km, 3 处防区受到外界环境扰动时的实时波形图, 由图 6 可

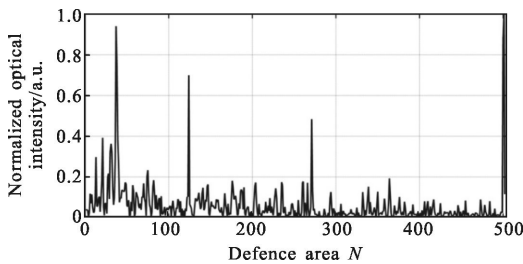


图 6 37、124、271 防区扰动时的实时瑞利散射归一化光强图

Fig.6 Normalized optical intensity of Rayleigh Scattering when there is disturbance in 37, 124, 271 zones

以看出, 当 3 处防区发生扰动时, 该防区瑞利散射信号脉冲将明显升高。而图 7 给出的是 3 处防区受到外界环境的扰动时采集并处理得到的初级模板, 由于是平均之后的波形图, 3 处防区的抖动较实时扰动波形略有降低。将此次得到的初级模板与先前实验室静止状态下采集 120 min 得到的中期信号进行

相关运算, 求得差值系数 δ 如图 8 所示。由图 8 可以看出, 当有 3 处扰动时, 差值系数 δ 大于 0.4 的个数明显上升, 相似性降低。由此可知, 当中期信号也发生扰动时, 与扰动的初级模板进行相关运算, 相似性只能是越来越低。

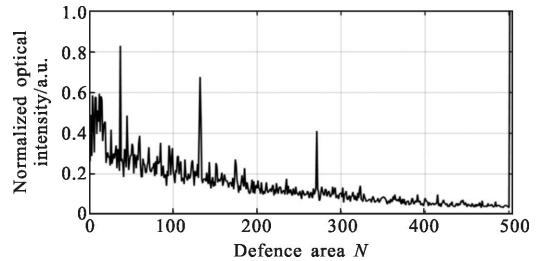


图 7 37、124、271 防区有扰动时的初级模板

Fig.7 Primary template when there is disturbance in 37, 124, 271 zones

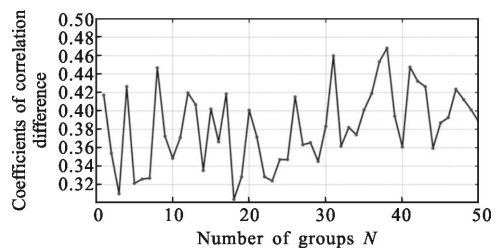


图 8 扰动时的初级模板与中期信号的相关差值系数

Fig.8 Coefficients of correlation difference between primary template and mid signal when disturbed

3.3 三种阈值算法对比

图 9 实线给出的是采集 120 min 的数据进行直接平均后的静态阈值, 图 9 点线给出是依据选择性平均算法得到的初期采集阈值。而图 9 虚线给出的是当移动平均次数 $P=30$ 时, 30 条瑞利散射曲线移动平均后的动态阈值。

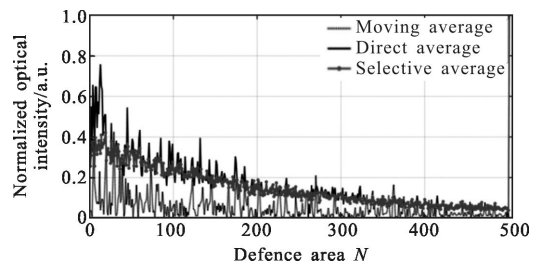


图 9 3 种方法采集阈值处理对比图

Fig.9 Comparison chart of three ways acquisition threshold

由图 9 可以看出, 选择性平均算法相比直接平均和移动平均算法, 脉冲抖动现象明显减弱, 有利于降低系统误报、漏报率的发生。

3.4 三种阈值算法误报、漏报率对比实验

经理论推导与实验证明,选择性平均算法在系统防误报和漏报率上与直接平均、移动平均算法相比,有显著提高。实验选取传感光纤的扰动点分别在1.45 km、3.65 km、7.25 km、13.55 km、18.15 km处,对应的防区分别为29、73、145、271、363,共5个防区。实验室经100组测试实验,表1给出100组测试中的一组,3种阈值算法在相同的5个防区漏报和误报测试分析。经100组测试实验分析,选择性平均误报率为3%,漏报率为2%,直接平均误报率为8%,漏报率为4%,移动平均误报率为6%,漏报率为4%。由实验结果可以得出,选择性平均相比直接平均算法,误报率降低了5%,漏报率降低2%,而选择性平均相比移动平均算法,误报率降低了3%,漏报率降低了2%。

表1 漏报、误报分析表

Tab.1 Analysis table of missing and nuisance alarm

| Defence area | Direct average | Moving average | Selective average | Real situation |
|--------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|
| 29 | Alarm | Alarm | Alarm | Alarm |
| 73 | No alarm | Alarm | No alarm | No alarm |
| 145 | Alarm | Alarm | Alarm | Alarm |
| 271 | Alarm | No alarm | No alarm | No alarm |
| 363 | Alarm | Alarm | Alarm | Alarm |

图10、11、12分别是一组强度因子 $\xi=2$ 的移动平均、直接平均及选择性平均最终阈值在1.45、3.65、7.25、13.55、18.15 km,对应标号为1、2、3、4、5,共5处测试点误报、漏报测试图。由图10、11、12可以直观地看出,选择性平均算法在系统防误报、漏报率明显降低。

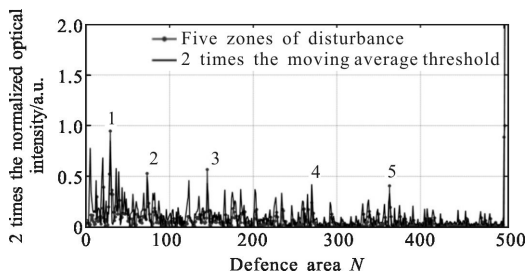


图10 移动平均算法漏报、误报分析图

Fig.10 Missing and nuisance alarm of moving average algorithm

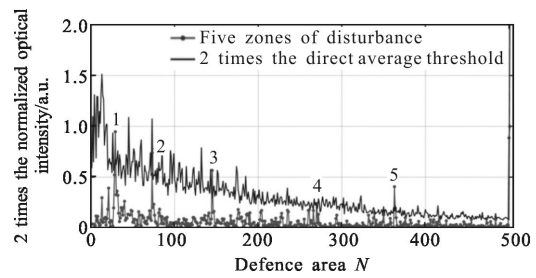


图11 直接平均算法漏报、误报分析图

Fig.11 Missing and nuisance alarm of direct average algorithm

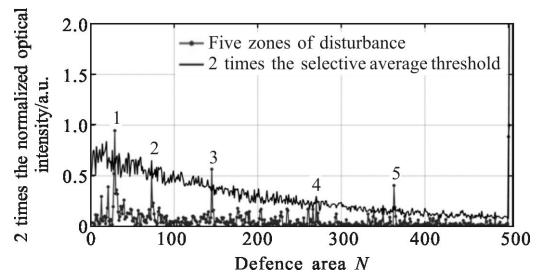


图12 选择性平均算法漏报、误报分析

Fig.12 Missing and nuisance alarm of selective average algorithm

3.5 三种阈值算法信噪比对比实验

图13给出了三种算法在同一点7.5 km,即150防区处扰动时的信噪比对比图,采用信噪比公式:

$$SNR=10\log \frac{V_{\text{signal}}}{V_{\text{noise}}} \quad (6)$$

计算可得三种算法:直接平均、移动平均、选择性平均的信噪比依次为:0.62、2.07、3.17 dB。相对于直接平均和移动平均信噪比分别提升了2.55、1.1 dB,效果显著。这是由于在阈值模板匹配过程中,剔除脉冲抖动大的瑞利散射周期信号的结果。

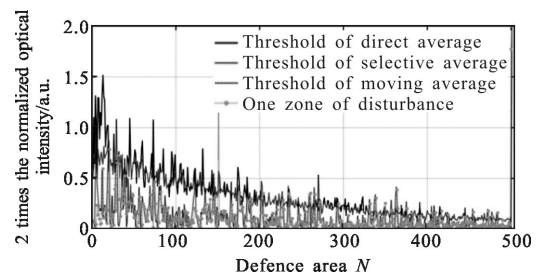


图13 3种算法同一点扰动时的SNR

Fig.13 Comparison chart of SNR when three kinds of algorithms disturbed in the same point

4 结论

针对 φ -OTDR分布式光纤扰动传感系统预警阈

值采集问题,文中提出了基于选择性平均的阈值算法,采用相关差值预挑选的方式确定信号模板,进行阈值模板匹配。理论和实验研究表明:证明该算法能够有效提高信噪比,降低系统的误报和漏报率。经100组测试实验分析,选择性平均阈值算法误报率为3%,漏报率为2%;直接平均阈值算法误报率为8%,漏报率为4%;移动平均阈值算法误报率为6%,漏报率为4%。与直接平均阈值算法相比,所提出的选择性平均阈值算法将误报率降低了5%、漏报率降低了2%,与移动平均阈值算法相比,选择性平均阈值算法将误报率降低了3%、漏报率降低了2%。并且与直接平均、移动平均阈值算法相比,信噪比分别提升了2.55、1.1 dB。文中提出的选择性平均算法在实时性与适应性得到了显著提高,更符合实际环境中的应用。

参考文献:

- [1] Lu Y, Zhu T, Chen L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(22): 3243-3249.
- [2] Liu Ming, Zhang Shulin, Li Hua, et al. Study of a selective averaging method formagnetocardiography-based noise suppression [J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62 (9): 098501. (in Chinese)
刘明, 张树林, 李华, 等. 一种应用于心磁噪声抑制的选择性平均算法研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(9): 098501.
- [3] Wang Jie, Jia Xinhong, Rao Yunjiang, et al. Phase-sensitive optical time-domain reflectometer based on bi-directional Raman amplification [J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62 (4): 044212. (in Chinese)
王杰, 贾新鸿, 饶云江, 等. 基于双向拉曼放大的相位敏感光时域反射仪[J]. *物理学报*, 2013, 62(4): 044212.
- [4] Wang Siyuan, Lou Shuqin, Liang Sheng, et al. Pattern recognition method of fiber distributed disturbance sensing system based on M-Z interferometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2613-2618. (in Chinese)
王思远, 娄淑琴, 梁生, 等. MZ 干涉仪型光纤分布式扰动传感系统模式识别方 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(8): 2613-2618.
- [5] Zhang Chunxi, Zhong Xiang, Li Lijing, et al. Long-distance intrusion sensor based on phase sensitivity optical time domain reflectometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 742-746. (in Chinese)
张春熹, 钟翔, 李立京, 等. 基于相位敏感光时域反射计的长距离入侵探测系统[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2): 742-746.
- [6] Lv Qiyang, Li Lijing, Wang Hongbo, et al. Influences of laser on fiber-optic distributed disturbance sensor based on Φ -OTDR [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (12):3918-3923. (in Chinese)
吕其英, 李立京, 王洪波, 等. Φ -OTDR 的分布式光纤扰动传感系统光源参数影响 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43 (12): 3918-3923.
- [7] Wang Z N, Li J, Fan M Q, et al. Phase-sensitive optical time-domain reflectometry with Brillouin amplification [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4313-4316.
- [8] 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.
- [9] Zhong X, Zhang C, Li L, et al. Influences of laser source on phase-sensitivity optical time-domain reflectometer-based distributed intrusion sensor[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(21): 4645-4650.
- [10] 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.