

基于双光束干涉的相位敏感光时域反射计

安 阳¹ 封 皓^{1*} 张景川² 冯 欣¹ 曾周末¹ 靳世久¹

(¹ 天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072; ² 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要 提出了一种基于双光束干涉的分布式光纤振动传感器, 利用双路瑞利散射信号的干涉效应探测振动信号并利用传统的光时域反射计定位原理进行定位。基于该原理提出一种新的信号处理方案, 在传统移动平均算法的基础上引入间隔参数并对信号进行标准化处理, 不仅可以降低系统运算量, 而且能去除因干涉灵敏度升高造成的本底噪声影响, 提高振动信号的信噪比。实验结果表明, 该系统可以有效探测到外界扰动信号并进行精确定位, 而且探测灵敏度较高。当传感光纤长度为 5 km 时, 系统空间分辨率可以达到 20 m, 信噪比约为 8.5 dB。该系统可以用于管道安全预警和周界安防以及结构健康监测等领域。

关键词 光纤光学; 分布式光纤传感; 振动检测; 光时域反射计; 信号处理

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0706005

Phase Sensitive Optical Time Domain Reflectometer Based on Two-Beam Interference

An Yang¹ Feng Hao¹ Zhang Jingchuan² Feng Xin¹ Zeng Zhoumo¹ Jin Shijiu¹

¹ State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China
² Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China

Abstract A distributed vibration sensor based on two-beam interference is proposed and experimentally demonstrated. Optical pulses are launched into two distributed fibers. With the interference effect of two channel Rayleigh scattering signals and the positioning principle of conventional optical time domain reflectometer (OTDR), detection and location of vibration events along sensing fibers can be achieved. A new signal processing method is subsequently utilized to improve the signal-to-noise ratio (SNR) of the signal and reduce the system computation. Experimental results show that the system can effectively detect and precisely positioning the external vibration events with high sensitivity. A validated optimal spatial resolution of 20 m is acquired under testing fiber length of 5 km and the SNR of the differential signal can be as high as 8.5 dB. This new interferometer can be used for long distance monitoring such as pipeline security pre-warning as well as any vibration monitoring.

Key words fiber optics; distributed fiber sensor; vibration detection; optical time domain reflectometer; signal processing

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 120.3180; 030.1670; 290.5870

1 引 言

传统的光时域反射计(OTDR)已经被广泛应用于通信领域中光纤衰减、裂纹、连接损耗及断点的测量^[1-3]。传统的 OTDR 将一系列光脉冲引入探测

光纤中,通过探测背向瑞利散射光强度的变化,提取探测光纤各处的光强反射率来获知折射率突变的信息,以此来探测光纤的长度或者是缺陷,例如断点或熔接点。为了减小相干瑞利散射的干扰(通常被称

收稿日期: 2013-02-04; 收到修改稿日期: 2013-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(61240038)

作者简介: 安 阳(1986-),男,博士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: anyang@tju.edu.cn

导师简介: 靳世久(1946-),男,教授,博士生导师,主要从事无损检测技术、信号处理技术等方面的研究。

E-mail: shjjin@tju.edu.cn

* 通讯联系人。E-mail: fenghao@tju.edu.cn

为相干瑞利噪声)^[4],传统的 OTDR 多数采用的是宽带光源。在相位敏感 OTDR 系统中,为了增强瑞利散射的干涉效果,需要采用超窄线宽的激光光源^[5-6]。由于脉冲宽度内许多散射中心的相干作用,返回的瑞利散射曲线被调制成为锯齿状^[7]。因此,该系统能够响应外界扰动对光相位的调制。通过分析锯齿状瑞利散射曲线的变化,就可以监测光纤周围的动态扰动事件。

在以往的研究中,相位敏感 OTDR 已经可以对拉伸或者加热光纤引起的相位扰动进行监测以及定位^[8-9]。Juarez 等^[10]通过现场试验探测到了 19 km 长度范围内的入侵事件,系统空间分辨率为 200 m。在文献^[11]中,外差探测方法被引入相位敏感 OTDR 系统中,在提升了信噪比的同时对采集到的外界扰动信号的频率成分进行了分析。后来, Qin 等^[12]通过采用保偏光纤将 1 km 探测范围内的系统空间分辨率提升到 1 m。另外,小波变换方法也被应用到相位敏感 OTDR 系统中对采集到的信号进行降噪处理^[13]。在国内,谢孔利等^[14]首先进行了相位敏感 OTDR 的研究,并且在 14 km 的监测范围内达到 50 m 的定位精度。另外,在文献^[15]中,应用了数字相干检测和维纳滤波技术,实时解调出了沿光纤链路散射回的瑞利信号电场的振幅和相位并降低了由激光器的相位噪声和探测器加性噪声引起的相位波动。

上述研究成果均基于单光束的传感结构,该结构探测灵敏度受光源线宽影响较大^[16]。因此,本文提出了一种无需使用超窄线宽光源的基于双光束干涉的相位敏感 OTDR 系统。该系统的定位原理与传统的 OTDR 相似,通过分析瑞利散射曲线中对应位置光强变化来定位外界扰动事件。不同的地方在于采用双光束背向散射曲线的干涉效应而非脉冲宽度内散射中心的干涉效应来探测外界扰动信号,因此探测灵敏度大大提高。另外,针对实验中由于灵敏度增大造成振动信号被噪声淹没的问题,提出了一种新的信号处理方案,不仅降低了系统运算量,而且提高了信号的信噪比。

2 系统结构及原理

系统结构与原理如图 1 所示。光源发出的连续光通过偏振控制器(PC)以后(偏振控制方法问题另文讨论)被声光调制器(AOM)调制为脉冲光,光脉冲通过环形器在 3 dB 耦合器处分为两束光并分别进入两根传感光纤传播。在传播过程中光纤各个位

置处形成的背向瑞利散射光信号会返回到首端耦合器,同时到达首端耦合器的背向散射光之间会发生干涉,由于两根光纤同在一根光缆中,两束干涉光的光程差非常小,因此本系统中超窄线宽光源不是必需的。干涉信号经过雪崩光电探测器(APD)转化为电信号,然后通过信号采集卡(DAQ)采集并输入工控机(IPC)进行处理。声光调制器的输入脉冲信号由工控机通过串口控制现场可编程逻辑门阵列(FPGA)生成,并且脉冲频率和脉宽都可以通过上位机程序进行调节以适应探测距离的改变。为了保证每一光脉冲引起的瑞利散射信号都被记录,FPGA 同时为上位机提供同步采集触发信号。

由于两路背向散射信号的干涉作用,传感区域内不同位置处的两路光脉冲干涉结果可能为干涉增强或者干涉消隐,因此散射曲线呈现为幅值随距离而上下波动的锯齿状波形。当外界有扰动事件发生时,探测器接收到的相应位置处的瑞利散射干涉信号光强将发生变化,因此,通过计算不同时刻瑞利散射曲线之间的差值即可实现外界扰动事件的检测,差值曲线中尖峰所对应的距离即为扰动事件的位置。

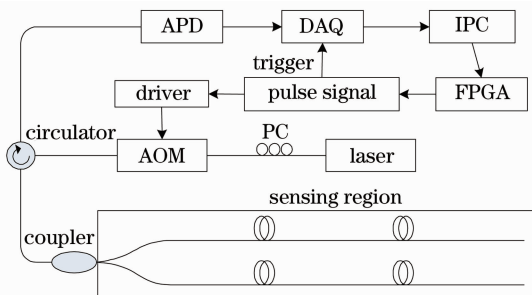


图 1 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic configuration of the system

3 信号处理方法

由于传感光纤固有的背向瑞利散射,单纯从原始信号来看,振动引起的干涉光强变化会被噪声完全淹没。为了滤除信号中随机噪声的影响、获得平稳的测试曲线图,需要先将触发采集到的原始曲线数据通过平均运算进行处理,一般采用的平均算法为分离平均算法^[10]和移动平均算法^[11]。假设特定时间段内采集到的原始曲线数目为 M ,平均次数为 N ,则由分离平均算法和移动平均算法分别可以得到 M/N 和 $M-N+1$ 条平均曲线。然而,由于通过分离平均算法得到的平均曲线之间存在一定的时间间隔,所以除了外界扰动信号引起的尖峰以外,差值曲线中很可能存在一些不能用平均算法滤除的低频

干扰噪声引起的伪尖峰。采用移动平均算法虽然可以消除干扰噪声的影响,但相邻两条平均曲线之间差异不明显,因此降低了差值曲线的信噪比。另外,由于移动平均算法运算量巨大,所以无法保证对振动事件的实时监测。

为了提高信号的信噪比,降低系统运算量,同时消除低频干扰噪声的影响,提出了一种新的移动平均算法来对原始数据进行处理。假设特定时间段内采集到的 M 条原始曲线表示为 $t = \{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_M\}$, 平均数目为 N , 引入一个间隔参数 n , 即两次平均运算的起始点间隔为 n , 这样平均曲线可以表示为 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_K\}$, 其中 $K = [(M - N)/n] + 1$, 而且

$$T_i = \frac{1}{N} \sum_{j=ni-n+1}^{ni-n+N} t_j, \quad i \in (1, [(M - N)/n] + 1). \quad (1)$$

为了获得平均曲线中的光强变化,需要将不同时刻的平均曲线相减得到最终的差值曲线。但由于双光束散射信号的干涉作用,散射曲线本底光强随着距离而改变,故即使相同的振动在不同位置处引起的光强变化也不相同。因此在求差值曲线之前需要先将平均曲线进行标准化处理,采用零-均值(z -score)标准化方法,假设 x_{ij} 为第 i 条平均曲线的第 j 个采样点的值,则 z -score 标准化方法可以表示为:

$$z_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j) / \sigma_j, \quad i \in \left(1, \frac{M - N}{n} + 1\right), \quad j \in (1, f_s / f), \quad (2)$$

式中 z_{ij} 为经过标准化处理后的平均曲线中各采样点的值, \bar{x}_j 为所有平均曲线中第 j 个采样点的平均值, σ_j 为所有平均曲线中第 j 个采样点的标准差, f_s 为采样频率, f 为光脉冲频率。

为了最大限度地提取平均曲线中的光强变化,将标准化处理后的平均曲线先逐级相减然后取绝对值相加得到最终的差值曲线:

$$\Delta = \sum_{i=1}^{(M-N)/n} |T_{i+1} - T_i|. \quad (3)$$

与传统的移动平均法相比,由于引入间隔参数 n , 所以如果存在外界扰动事件,则相邻两条平均曲线之间在扰动位置处的差异辨识度大大提升,而且由于平均曲线数量减少,运算量降低,系统运行效率大为提升,从而保证了系统监测实时性的要求。与分离平均算法相比,该方法仍属于移动平均算法(实际上,当 $n = N$ 时,移动平均算法变为分离平均算法),适当选取间隔参数 n 的值,就能够有效避免分

离平均算法所引起的低频干扰噪声的影响。另外,由于采用了标准化方法,所以避免了平均曲线中各处本底光强不一致带来的影响。

4 实验与结果分析

图 1 所示的实验系统中光源采用普通的激光二极管(LD),最大功率为 80 mW。光电探测器采用 THORLABS 公司生产的 APD。DAQ 使用 NI 公司生产的 NI-5122 型高速采集卡,最高采样频率可以达到 100 MS/s。实验地点为大港-枣庄成品油管道,实验设备位于大港输油站内,系统采用的传感光缆为与管道同沟敷设的 GYTA 六芯单模通讯光缆,位于管道正上方约 30 cm,与地面垂直距离约 1.5 m。选取其中一段进行实验,经过 OTDR 测量,传感光缆长度约为 5.1 km。根据脉冲周期 T 与探测距离 S 的对应关系 $S = cT/2n_i$, 其中 c 为真空中的光速, n_i 为光纤纤芯折射率。为了避免相邻原始曲线之间产生叠加干扰, FPGA 输出参考脉冲频率设定为 16 kHz。

在 OTDR 系统中,在脉冲频率确定的情况下,脉冲宽度可以影响系统空间分辨率及探测距离,脉冲宽度越宽,探测距离越远,空间分辨率越低,反之亦然^[17]。经过多次验证,实验中脉冲宽度的取值为 200 ns。由空间分辨率 ΔZ 与脉冲宽度 τ 之间的对应关系 $\Delta Z = c\tau/2n_i$ 可知,此时系统的理论空间分辨率为 20 m。

为了模拟外界扰动,在管道沿线上方地表进行人工夯砸,实验地点距离光缆首端约 2.5 km。图 2 显示了采集到的原始信号经过该平均算法处理以后得到的平均曲线。其中,原始曲线数目 $M = 800$ (即 50 ms 内采集到的数据),平均次数 $N = 100$,间隔参数 n 的取值应在保证信号信噪比的前提下适当增大以降低系统运算量,经过多次试验验证,间隔参数最终取值为 5,所以图 2(a)中所示为 141 条平均曲线叠加的结果。从图中可以看出散射曲线在 5.1 km 以后光强为零,与传统 OTDR 测量结果一致,不过由于双光束干涉效应,瑞利散射曲线图显示为与传统的相位敏感 OTDR 相似的锯齿状波形。图 2(b)显示了 141 条叠加平均曲线在 2.2~3 km 范围内的放大图,从该图中可以看出,由于扰动事件的影响,叠加曲线的幅值在大约 2570 m 处出现明显抖动,而在其他位置所有曲线幅值一致性较好。

将上述曲线按(2)式和(3)式进行标准化处理和差值运算以后就可以得到最终的差值曲线,如图 3 所

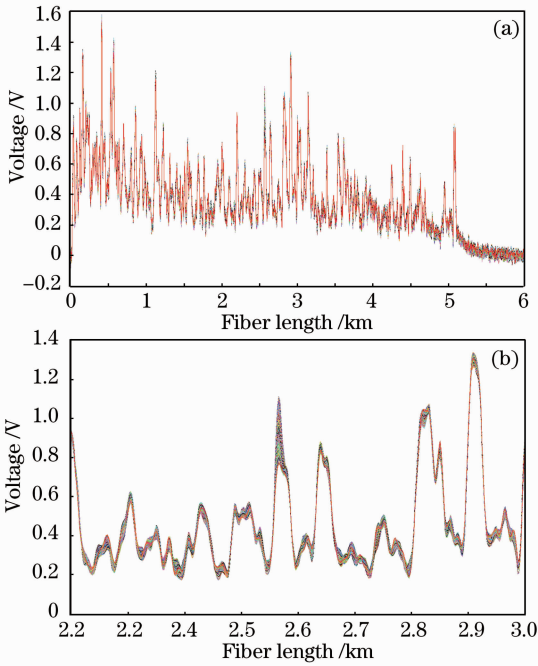


图2 平均曲线叠加图。(a)全光纤范围；(b) 2.2~3 km 范围局部放大

Fig. 2 Superimposed averaged traces (a) in the range of the whole fiber length and (b) partial enlargement in the range of 2.2~3 km

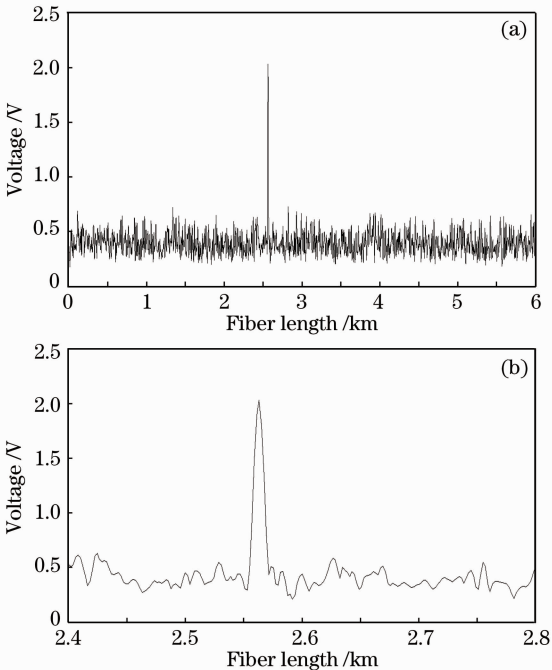


图3 差值曲线图。(a)全光纤范围；(b)局部放大

Fig. 3 Differential trace (a) in the range of the whole fiber length and (b) partial enlargement in the range of 2.4~2.8 km

示。经过实测,图中尖峰信号对应位置为 2566 m,信噪比为 8.5 dB。因此通过设定探测阈值,检测差值信

号中过阈值的尖峰及其对应位置就可以实现对外界扰动事件的探测及定位。从差值信号局部放大图中可以看到,按照尖峰 3 dB 衰减计算,空间分辨率大约为 20 m,与理论计算得到的空间分辨率相一致。

为了测试系统对同时发生的事件的响应能力并进一步验证系统空间分辨率,在管道上方地表相距 20 m 同时进行人工夯砸实验,实验得到的差值曲线如图 4 所示。从图中可以看到两个明显的尖峰,对应位置分别为 2567 m 和 2590 m。

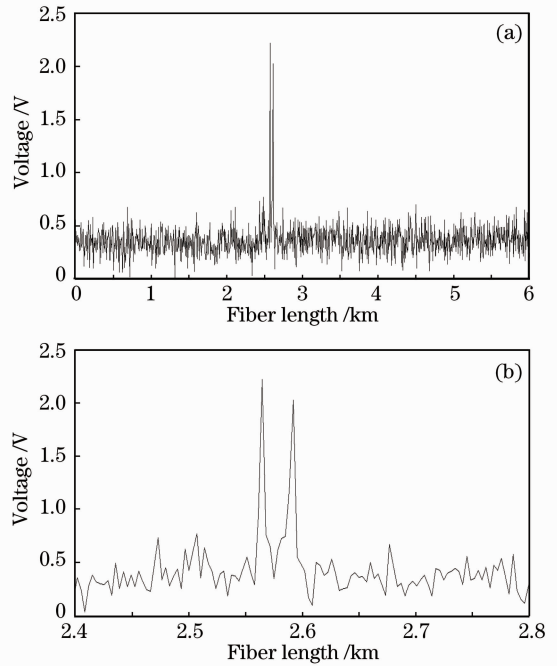


图4 并发振动实验结果。(a)全光纤范围；(b) 2.4~2.8 km 局部放大

Fig. 4 Simultaneous measurement of two vibration events (a) in the range of the whole fiber length and (b) partial enlargement in the range of 2.4~2.8 km

最后,通过将原始散射曲线中对应相同位置处的采样点连接成一条曲线就得到该位置处的振动时

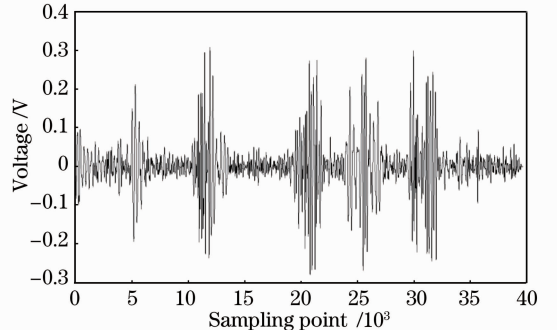


图5 2560 m 位置处域波形

Fig. 5 Time domain signal acquired corresponding to the distance of 2560 m

域信号,该时域信号的采样率等于脉冲调制信号的频率,实验中为 16 kHz。图 5 显示了所有原始曲线中对应于 2560 m 位置处的采样点的连接结果,总采样点数为 4×10^4 ,即 2.5 s 的时域振动信号,从图中很明显可以看到由于人工夯砸引起的 5 次扰动信号。

5 结 论

提出了一种无需使用超窄线宽光源的基于双光束干涉的相位敏感 OTDR 系统,采用双光束背向散射曲线的干涉效应而非脉冲宽度内散射中心的干涉效应来探测外界扰动信号,探测灵敏度相较普通相位敏感 OTDR 大大提高。针对结构实验中由于灵敏度增大造成振动信号被噪声淹没的问题,提出了一种间隔移动平均和 z -score 标准化相结合的信号处理方法,不仅降低了系统运算量,而且能锐化振动尖峰,提高信号的信噪比。实验结果表明该系统对外界扰动有较高的探测灵敏度,当传感光缆长度为 5 km 时,定位分辨率能达到 20 m,信噪比约为 8.5 dB。该系统可以用于管道安全预警、周界安防以及结构健康监测等领域。

参 考 文 献

- 1 M K Barnoski, S M Jensen. Fiber waveguides; a novel technique for investigating attenuation characteristics[J]. Appl Opt, 1976, 15(9): 2112—2115.
- 2 M K Barnoski, M D Rourke, S M Jensen, *et al.*. Optical time domain reflectometer[J]. Appl Opt, 1977, 16(9): 2375—2379.
- 3 Y Koyanada, H Nakamoto. High performance single mode OTDR using coherent detection and fiber amplifiers[J]. Electron Lett, 1990, 26(9): 573—574.
- 4 Chang Le, Dong Yi, Sun Dongning, *et al.*. Influence and suppression of coherent Rayleigh noise in fiber-optic-based phase-stabilized microwave-frequency transmission system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0506004.
常 乐,董 毅,孙东宁,等. 光纤稳相微波频率传输中相干瑞利噪声的影响与抑制[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0506004.

- 5 H F Tarlor, C E Lee. Apparatus and Method for Fiber Optic Intrusion Sensing[P]. U. S. Patent 5194847, 1993.
- 6 Song Rui, Chen Shengping, Hou Jing, *et al.*. All-fiber pulsed laser with narrow line width[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0502002.
宋 锐,陈胜平,侯 静,等. 全光纤窄线宽脉冲激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0502002.
- 7 P Healey. Fading in heterodyne OTDR[J]. Electron Lett, 1984, 20(1): 30—32.
- 8 W Seo. Fiber Optic Intrusion Sensor Investigation[D]. College Station; Texas A&M University, 1994.
- 9 K N Choi, H F Taylor. Spectrally stable Er-fiber laser for application in phase-sensitive optical time-domain reflectometry [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2003, 15(3): 386—389.
- 10 J C Juarez, H F Taylor. Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters[J]. Appl Opt, 2007, 46(11): 1968—1971.
- 11 Y Lu, T Zhu, L Chen, *et al.*. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(22): 3243—3249.
- 12 Z Qin, T Zhu, L Chen, *et al.*. High sensitivity distributed vibration sensor based on polarization-maintaining configurations of phase-OTDR[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2011, 23(15): 1091—1093.
- 13 Z Qin, L Chen, X Bao. Wavelet denoising method for improving detection performance of distributed vibration sensor[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(7): 542—544.
- 14 Xie Kongli, Rao Yunjiang, Ran Zengling. Distributed optical fiber sensing system based on 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.
谢孔利,饶云江,冉曾令. 基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的 φ 光时域反射计光纤分布式传感系统[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 569—572.
- 15 Liang Kezhen, Pan Zhengqing, Zhou Jun, *et al.*. Multi-parameter vibration detection system based on phase sensitive optical time domain reflectometer[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0805004.
梁可桢,潘政清,周 俊,等. 一种基于相位敏感光时域反射计的多参量振动传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0805004.
- 16 S V Shatalin, V N Treschikov, A J Rogers. Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical-fiber sensing[J]. Appl Opt, 1998, 37(24): 5600—5604.
- 17 Lü Yuelan, Xing Yongwei. Investigation on Rayleigh scattering waveform in phase optical time domain reflectometer[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0819001.
吕月兰,行永伟. 相位光时域反射计瑞利散射波形特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0819001.

栏目编辑: 张 腾