

# 光纤故障可视的混沌光时域反射测量方法

张 丽 王安帮 李 凯 王云才

(太原理工大学物理与光电工程学院, 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

**摘要** 提出了一种集相关法距离测量和可视化故障查找于一体的光纤故障定位方法。利用外光反馈红光半导体激光器产生的宽带红光混沌作为探测信号, 通过对故障点反射的回波信号与参考信号进行互相关处理实现光纤故障的距离测量; 结合故障位置因探测红光泄漏而具有的可视性, 实现了单、多故障点的可测可视化定位。结果表明, 该方法可初步实现分辨率为 3.9 cm、与动态范围无关、测量范围约为 500 m 的故障事件可测可视化定位。

**关键词** 光通信; 光纤故障定位; 相关法; 可见光混沌

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0308007

## Fiber Fault Visible Chaotic Optical Time Domain Reflectometry Measurement Method

Zhang Li Wang Anbang Li Kai Wang Yuncai

(Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

**Abstract** A method for fiber fault location with distance measurement and visual fault search is presented. Broadband red chaotic signal, generated by utilizing the optical feedback of a red diode laser, is used as the signal light. Distance measurement between initial point and fiber fault is obtained by correlation between reference and back reflected signal waveform. Further visible search is realized by the dazzling spot at fault position owing to the leakage of signal light exactly. Experimental results demonstrate that the proposed method can realize the locations of single and multiple fiber faults, and the fiber fault at about 500 m is measured with a resolution of 3.9 cm, which is independent of the range of the fault position.

**Key words** optical communications; fiber fault location; correlation; visible optical chaos

**OCIS codes** 140.7300; 140.1540; 120.4825

## 1 引 言

光时域反射仪(OTDR)<sup>[1]</sup>是现代光通信检测常用的光纤故障检测方法, 通过检测光纤后向瑞利散射和菲涅耳反射信号, 得到探测脉冲往返的时间和强度信息来表征光沿其传播方向的衰减特性。传统 OTDR 采用脉冲光作为探测信号, 其原理上存在测量距离和分辨率无法同时提高的问题。为改善传统脉冲 OTDR 的测量性能, 学者们提出了光子计数

OTDR<sup>[2~5]</sup>、相干 OTDR<sup>[6~9]</sup>、低相干 OTDR<sup>[10~14]</sup> 和脉冲编码 OTDR<sup>[15~17]</sup>, 这些技术在不同方面改善了传统单脉冲式光时域反射技术。但光子计数 OTDR 因光电探测器工作环境的低温要求限制了在实际中的应用<sup>[18]</sup>; 相干 OTDR 要求探测光源具有较高的相干性<sup>[8]</sup>, 因此引入的相干瑞利噪声<sup>[19]</sup>为测量带来了较大误差; 低相干 OTDR 提高了传统 OTDR 的空间分辨率, 但其测量对象仅限于波导结构器件的

**收稿日期**: 2012-10-22; **收到修改稿日期**: 2012-11-27

**基金项目**: 国家自然科学基金(60908014)、国家自然科学基金科学仪器专项(60927007)和山西省科技攻关项目(20100321055-02)资助课题。

**作者简介**: 张 丽(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事故障可视的混沌光时域反射测量方法方面的研究。

E-mail: 695359890@163.com

**导师简介**: 王云才(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事半导体激光器的非线性动力学特性及其应用等方面的研究。

E-mail: wangyc@tyut.edu.cn(通信联系人)(中国光学学会会员号: S042011300S)

故障检测<sup>[11]</sup>;且这3种技术并未从根本上解决测量分辨率随动态范围增加而降低的问题。伪随机码调制的 OTDR<sup>[20]</sup>增加了传统光时域反射仪的测量动态范围,但测量分辨率受伪随机码调制的电子带宽限制,相比传统单脉冲式 OTDR 没有大的突破。

基于混沌互相关法<sup>[21~23]</sup>的光时域反射技术作为新一代的光纤故障点定位技术,利用宽带的混沌激光<sup>[24]</sup>作为探测光,通过对参考信号和探测光回波信号进行互相关处理实现故障距离信息的测量,克服了上述光时域反射技术的缺陷,实现了空间分辨率为 6 cm 且与测量距离无关的故障检测。

但是,在实际的光纤故障检测中,地下光缆并非完全拉直铺设,故障位置的查找仅依靠检测点和故障点间距离测量无法快速实现,实际故障查找需要引入辅助工具,通常将红光激光笔的输出光注入待测光纤,利用光纤故障点泄漏的红光实现故障位置查找。该方法在实际的应用过程中,要求检测装置内置 2 个激光源并通过切换来最终实现故障定位。

红光半导体激光器与其他半导体激光器类似,在外光反馈下其输出经过周期分叉进入混沌状态,不同反馈强度和不同腔长时光反馈红光半导体激光器的输出动态特性已经得到了研究<sup>[25]</sup>。基于文献<sup>[25]</sup>的研究,本文提出利用红光混沌同时实现光纤故障距离测量和可视化查找的定位方法,利用红光半导体激光器外光反馈产生的红光混沌作为探测光,通过互相关运算实现光纤故障距离测量,结合故障点因红光混沌泄漏而发出的人眼可见亮光,实现光纤故障的可测可视化定位。与现有的光纤故障检测方法相比较,该方法不仅实现了高空间分辨率、与距离无关的测量,而且利用一个激光源同时实现了光纤故障距离信息的测量和位置的可视化查找。实验分析了实现光纤故障可视化检测的红光混沌源特性,并利用其作为探测光实现了光纤故障点的距离测量和可视化定位,分析了影响其测量动态范围和空间分辨率的因素。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示,图中实线和虚线分别表示光信号和电信号的传输。虚线框内红光混沌源由一个红光半导体激光器和外光反馈装置构成,激光器的直接输出经偏振光分束镜(PBS)分为偏振方向互相垂直的两束线偏振光,其中一束经外部反射镜 M 反射后耦合进激光器输出混沌,另一束输出实现光纤故障检测。由 PBS 输出的红光混沌经 50:50

的分束镜(BS)分为两束,其中一束作为参考光经光电探测器 PD2 转换为电信号,另一束通过聚焦透镜 L3 耦合入待测光纤,经光纤后向散射和反射的探测光在 BS 处分为反射和透射光,其中透射部分作为回波信号经光电探测器 PD1 转换为电信号。PD1 和 PD2 转换的电信号由实时示波器(OSC)记录其相应的波形,并通过计算机实现互相关运算,得到待测光纤的故障距离信息。结合故障位置因红光混沌泄漏而产生的人眼可见亮斑,即可实现故障位置的快速准确查找。实验通过调节半波片(HWP)主光轴和激光原始偏振方向间角度实现反馈光强度调节,改变激光器的输出状态。

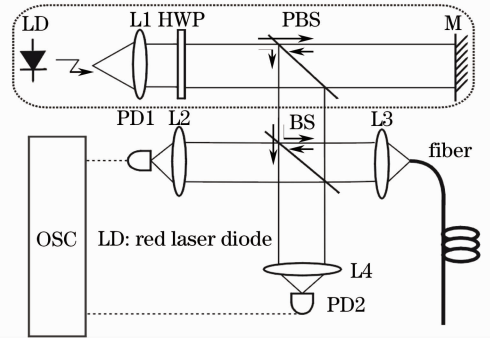


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experiment setup

实验所用的单模红光半导体激光器(SANYO DL-5147),输出光中心波长为 655 nm,阈值电流  $I_{th}$  为 53.4 mA,量子转换效率为 0.75 mW/mA,激光器的工作温度由外部温度控制源(Lightwave LDT-5412)稳定在 25 °C。两个光电探测器型号相同,即 ET-2030,其截止频率为 1.2 GHz。实现电信号记录的数字实时示波器型号为 Lecroy SDA8Zi-A,其最大带宽和采样率分别为 6 GHz 和 40 Gsample/s。

## 3 红光混沌源的特性

通过实验研究了红光半导体激光器在驱动电流和外腔长度固定,改变反馈光强度时其输出状态的变化情况。实验中激光器的驱动电流  $I=1.31I_{th}$ ,外腔长度  $L_{ext}=14$  cm,通过调节 HWP 的光轴偏转角度实现反馈光强度调节,并由实时示波器和频谱仪(Agilent N9020)记录输出信号的时序和频谱。用反馈光和激光器输出光功率之比  $k$  表征反馈光强度,忽略反馈光耦合时的损耗,定义反馈强度系数  $k$  的表达式为

$$k = 10\{[R(1 - \eta_1)(1 - \eta_2)(\sin 2\alpha)^2]^2\}, \quad (1)$$

式中  $R=90.21\%$  为反射镜的反射率,  $\eta_1=19.88\%$

为半波片的损耗,  $\eta_2 = 5.41\%$  为偏振光分束镜的损耗,  $\alpha$  为激光原始偏振与半波片光轴方向的夹角。实验通过改变  $\alpha$  的值, 实现对反馈光强度的调节, 改变激光器的输出状态。

光反馈红光半导体激光器进入混沌的路径与其他半导体激光器一致<sup>[25]</sup>, 随着反馈强度的增加其输出经历周期分叉进入混沌状态。当  $k$  处于  $-23.73$  dB 和  $-20.12$  dB 之间时, 较弱的反馈光强度并未改变激光器的输出状态, 仅增大了其输出功率, 激光器仍然保持稳态输出; 通过调节半波片增大反馈光强度; 当  $k$  处于  $-20.12$  dB 和  $-18.25$  dB 之间时, 激光器输出的峰峰值增大, 且幅度基本不变, 进入单周期状态; 继续增大反馈光强度, 激光器回归稳态输出, 然后进入二倍周期状态; 当  $k$  处于

$-12.75$  dB 和  $-12.15$  dB 之间时, 光反馈半导体激光器输出进入短暂的混沌状态, 而后重新回归稳态; 当  $k$  大于  $-10.50$  dB 时, 光反馈红光半导体激光器的输出进入稳定混沌状态。

为进一步研究光反馈红光半导体激光器的混沌输出特性, 分析了反馈强度系数为  $-10.20$  dB 时激光器输出混沌的时序、相图、频谱和自相关曲线。如图 2 所示, 从时序上看, 红光混沌的输出具有类噪声特性; 相图表现了产生红光混沌的非线性; 输出混沌的频谱表明探测到的混沌带宽约为  $1.2$  GHz, 该带宽受限于所用探测器  $1.2$  GHz 的响应带宽; 自相关曲线类似  $\delta$  函数形状, 说明红光混沌有较好的相关性, 可用作混沌相关法测量的探测光。

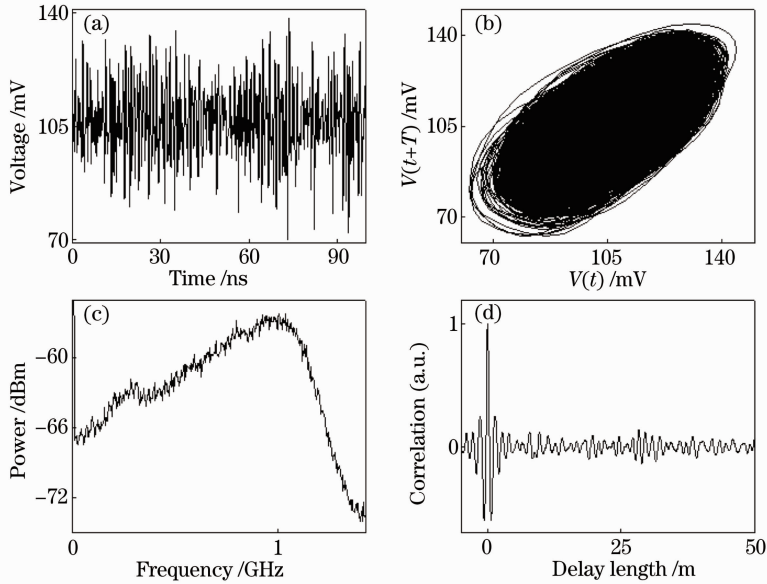


图 2 红光混沌特性。(a) 时序; (b) 相图; (c) 频谱; (d) 自相关曲线

Fig. 2 Characteristics of red chaos. (a) Time series; (b) phase portraits; (c) spectrum; (d) auto-correlation trace

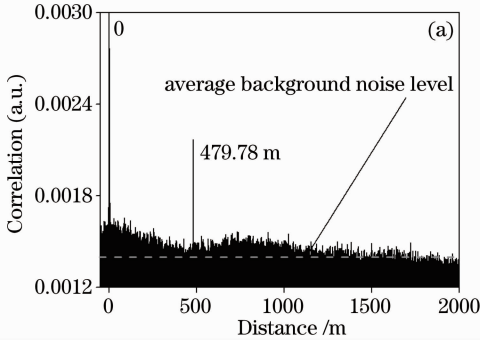
## 4 红光混沌实现光纤故障检测

### 4.1 单反射事件测量

基于红光混沌同时实现光纤故障距离测量和可视化查找的实验, 待测光纤是一定长度传输中心波长为  $1550$  nm 的单模光纤, 实验中通过将待测光纤距离光接入端约  $480$  m 位置处的光纤完全折断, 来模拟实际的光纤故障。故障测量实验中, 激光器的驱动电流  $I = 90$  mA, 调节  $k$  为  $-8.5$  dB 时产生红光混沌, 经 BS 分成两束, 其中一束由空间聚焦透镜 L3 通过光纤接头耦合入待测光纤, 实际注入光纤的探测光功率为  $-2.52$  dBm, 耦合效率为  $22.4\%$ 。图 3 为实验结果, 其中图 3(a) 为通过红光混沌互相

关法测量到的反射位置, 位于  $0$  处的互相关峰是红光混沌由空间到光纤实现耦合的连接头反射形成的, 经过数据处理将该位置标定为距离测量的零点, 消除因探测光和参考光通过的光程不同而引入的测量误差。第 2 个峰为实际光纤折断点的位置, 测量得到光纤折断点与零点的距离为  $479.78$  m。实验中光纤回波信号的接收由空间装置实现, 因空间传输过程中存在较大噪声, 实验通过平均处理方法来降低噪声水平, 图 3(a) 实验结果由 400 次互相关数据经过平均处理得到。图中虚线为测量过程的平均背景噪声水平, 通过  $[\bar{n} + 3 \times \text{std}(n)]$  计算得到,  $n$  为互相关处理后的噪声值,  $\text{std}()$  为统计标准偏差值。

图 3(b)是测量过程中因红光混沌在光纤故障位置泄漏而产生的可视亮斑,红光具有较强的穿透性,可



以透过厚度约为 3 mm 的黄色包层。故障的定位以距离测量为基础,可通过亮斑的查找实现。



图 3 单反射事件测量结果。(a)红光混沌互相关法对光纤故障距离信息的测量结果;(b)光纤故障位置因红光混沌泄漏而产生的亮斑

Fig. 3 Measurement results of single reflection event. (a) Results of correlation measurement; (b) light spot by the leakage of the red chaos

#### 4.2 多反射事件测量

为进一步研究红光混沌互相关法测距对实际光纤检测中多故障点的测量性能,实验通过一个松动的光纤连接器连接两段长度分别为 1.84 m 和 0.34 m 的光纤,并以两光纤端面的反射模拟实际的多故障点反射。实验结果如图 4 所示,1.84 m 和 2.18 m 处的互相关峰分别由两光纤端面反射形成。距离反射峰±0.1 m 处存在由激光器弛豫振荡引入的次高峰,因同一个激光器的弛豫振荡频率固定不变,故其导致的次高峰与主峰间的距离也是固定的,在实际测量过程中可对该处峰值进行处理而避免误判。但该处理方法可能将故障距离差为 0.1 m 的两个反射事件判断为单反射事件,导致漏判。实验结果表明,红光混沌光时域反射技术可以同时实现距离差为 0.34 m 的两反射事件测量。

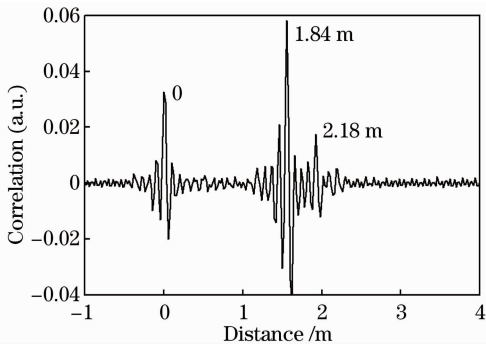


图 4 多反射事件测量

Fig. 4 Measurement of multiple reflection events

基于红光混沌互相关法实现光纤故障测量的空间分辨率由探测光自相关曲线的半峰全宽(FWHM)决定<sup>[19]</sup>,实验中外光反馈的红光混沌自相关曲线 FWHM 为 3.9 cm,如图 5 所示,表明采用

该混沌光实现互相关法测量时,可以达到 3.9 cm 的空间分辨率,且该测量分辨率受限于所用探测器的 1.2 GHz 响应带宽。

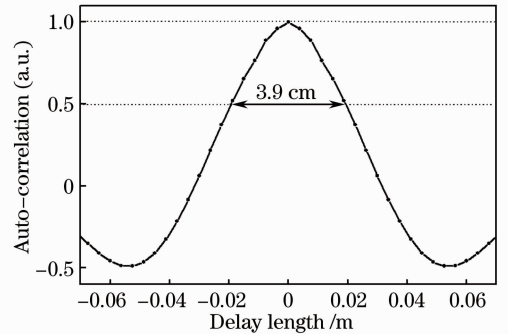


图 5 红光混沌自相关信号的 FWHM  
Fig. 5 FWHM based on the auto-correlation of red chaos

#### 4.3 动态范围测量

为评估探测光功率为 -2.52 dBm 的红光混沌在现有实验装置条件下的实际可测范围,实验对长度分别为 2.24、12.12、50、100、150、379 和 479 m 的待测光纤进行测量,并对不同测量长度的互相关结果取 400 次数据的平均,通过分析其峰值噪声比(PNR)与传输距离的关系,得到该功率红光混沌的测量动态范围。其中,PNR 函数的定义式为

$$R_{PN} = 10 \lg \left\{ \frac{p}{[\bar{n} + 3 \times \text{std}(n)]} \right\}, \quad (2)$$

式中  $p$  和  $n$  分别代表互相关处理的信号和噪声值。实验结果如图 6 所示,以  $R_{PN} = 0$  dB 为可以实现故障检测的判断标准,得到在现有实验装置条件下可实现的故障检测范围为 550 m。



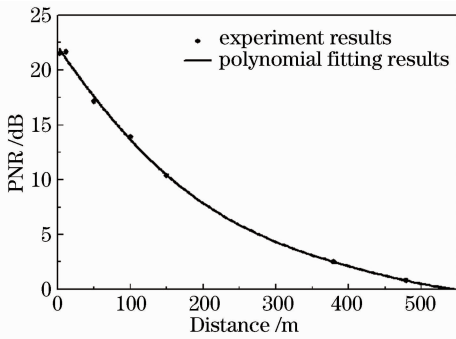


图 6 动态范围测量

Fig. 6 Measurement results of dynamic range

## 5 讨 论

本文提出的光纤故障可视的混沌光时域反射测量方法改进了传统的光纤故障测量方法：脉冲式 OTDR、伪随机码 OTDR 和混沌互相关法 OTDR。与脉冲式 OTDR 相比，本技术从原理上彻底克服了测量动态范围和提高分辨率相互制约的缺陷；与伪随机码 OTDR 相比，红光混沌信号可达数十吉赫兹，摆脱了电子带宽对测量分辨率的限制；相较于混沌互相关法 OTDR，本技术继承了其有利之处——与距离无关的高精度测量，也弥补了其在实际测量中的不足，使故障点在测量过程中具有可见性。以上 3 种传统方法在实际的故障检测中仅能实现故障距离信息的测量，故障位置的查找还需要借助其他检查手段进行二次测量，而本文提出的基于红光混沌的故障可视混沌光时域反射测量方法，利用宽带的可见混沌激光作为探测信号，同时解决了故障距离测量和位置查找的问题。但该方法使用的探测光源在单模光纤中的传输损耗较大，制约了其在长距离测量中的应用，动态范围的增加可以通过后续的数据平均处理方法，增加探测光功率和回波信号接收装置灵敏度来实现。

基于空间装置产生的红光混沌在实现较远的光纤故障测量时，单次互相关处理故障位置的峰值淹没在噪声中，数据处理采用多次平均的方法来提高 PNR 及相应的动态范围，并在此基础上研究了平均次数对 PNR 的影响。图 7 是测量距离为 479 m 时的结果，在平均次数低于 5 次时，PNR 与平均次数呈线性增长的关系；而在 5 次和 400 次之间时，PNR 随平均次数增加缓慢升高；当平均次数大于 400 次时，PNR 基本在一个固定值附近小幅度振荡。故实验中采用 400 次平均的数据处理方法。

基于红光混沌实现光纤故障可视化检测的测量

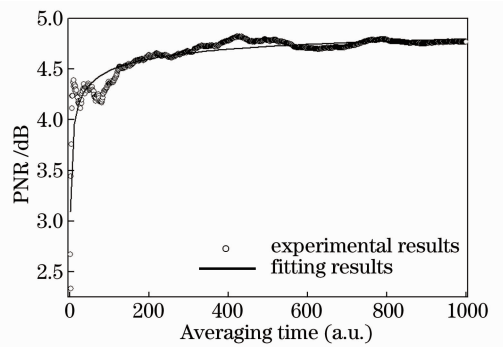


图 7 平均次数对峰值噪声比 PNR 的影响

Fig. 7 Influences of averaging times to PNR

方法，测量动态范围的提高可以通过增加注入光纤的光功率和回波信号接受装置的探测灵敏度来实现。采用光纤中的实验装置代替空间装置可实现注入光纤功率的增加，当探测光功率为 20 dBm 时，可实现的测量距离约为 2.5 km；提高回波信号接收装置的探测灵敏度，可以用雪崩光电二极管 (APD) 代替现有的光电探测器，若 APD 的最小可探测光功率为 1 nW，注入光纤功率为 20 dBm，可实现的测量距离约为 4 km。

该光纤故障测量方法，探测光源的中心波长为 655 nm，当探测光功率为 2 mW 时，该方法可实现的测量距离为 2 km，故障可视化查找的范围为 5 km；而利用普通的红光笔 (GT-3C04) 进行光纤故障查找时，可实现的查找范围为 5 km，但无法实现故障距离测量。测量距离小于故障可视化查找范围的原因在于：距离测量利用对故障点的反射光进行处理来实现，探测光需往返传输且保证有一定的信噪比，而可视化查找只是通过探测光在单程传输中从故障点泄漏的光实现，仅需保证有很小的溢出光功率 (可见即可) 而不考虑信号特征。实验测得该波长光在通信光纤 (1550 nm) 中的传输损耗为 8 dB/km，往返传输势必带来很大的光功率衰减而缩短测量距离。虽然该波段的光在通信光纤中的传输损耗大，但在面向数千米长度的光纤故障检测中，如在短距离的光纤城域网、局域网，尤其是基于光纤接入 (FTTx) [光纤到楼 (FTTB)、光纤到路边 (FTTC)、光纤到户 (FTTH) 等] 的光网络中，该方法因可同时实现故障距离测量和位置可视化查找而具有故障快速精准定位的独特优势。

## 6 结 论

提出的基于红光混沌实现光纤故障快速精准定位的故障可视混沌光时域反射测量方法，利用红光

半导体激光器外光反馈产生的红光混沌作为探测光,通过混沌互相关法初步获得了距离约为 500 m 的单反射事件和相距 0.34 m 的多反射事件测量,且测量分辨率与故障位置无关。与现有的光纤故障定位方法相比,故障可视的混沌光时域反射测量方法使得光纤故障位置兼具可测和可视特性,且实际定位不需要引入辅助工具,即可实现光纤故障定位,特别是面向弯曲光缆的故障定位,节省了大量的时间和精力。

## 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 P. Healey, P. Hensel. Optical time domain reflectometry by photon-counting[J]. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(16): 631~633
- 3 M. Wegmuller, F. Scholder, N. Gisin. Photon-counting OTDR for local birefringence and fault analysis in the metro environment [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(2): 390~400
- 4 Junhui Hu, Qingyuan Zhao. Photon-counting optical time-domain reflectometry using a superconducting nanowire single-photon detector[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2012, **30**(16): 2583~2588
- 5 Tian Yuzhen, Zhao Shuai, Guo Jin. Analysis of non-cooperative target photon counting laser ranging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0514002  
田玉珍, 赵帅, 郭劲. 非合作目标光子计数激光测距技术研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0514002
- 6 P. Healey. Fading in heterodyne OTDR[J]. *Electron. Lett.*, 1984, **20**(1): 30~32
- 7 H. Izumita, Y. Koyamada, S. Furukawa *et al.*. Stochastic amplitude fluctuation in coherent OTDR and a new technique for its reduction by stimulating synchronous optical frequency hopping[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(2): 267~278
- 8 Lidong Lu, Yuejiang Song, Fan Zhu *et al.*. Coherent optical time domain reflectometry using three frequency multiplexing probe [J]. *Opt. Laser Eng.*, 2012, **50**(12): 1735~1739
- 9 Zhong Zhen, Song Yuejiang, Chen Mengmeng *et al.*. Restrain of stimulated Brillouin scattering in coherent optical time domain reflectometer[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(10): 1549~1502  
钟镇, 宋跃江, 陈勳勳等. 相干光时域反射仪中受激布里渊散射的抑制[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(10): 1549~1502
- 10 K. Takada, M. Shimizu, M. Horiguchi *et al.*. Ultrahigh-sensitivity low coherence OTDR using Er<sup>3+</sup>-doped high-power superfluorescent fiber source[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(1): 29~31
- 11 W. V. Sorin, D. M. Baney. A simple intensity noise reduction technique for optical low-coherence reflectometry [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(12): 1404~1406
- 12 K. Takada, A. Himeno, K. Yukimatsu. Phase-noise and shot-noise limited operations of low coherence optical time domain reflectometry[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(20): 2483~2485
- 13 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
- 14 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
- 15 N. Park, J. Lee, J. Park *et al.*. Coded optical time domain reflectometry: principle and applications [C]. *SPIE*, 2007, **6781**: 678129
- 16 M. D. Jones. Using simplex codes to improve OTDR sensitivity [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **15**(7): 822~824
- 17 D. Lee, H. Yoon, P. Kim *et al.*. Optimization of SNR improvement in the noncoherent OTDR based on simplex codes [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1): 322~328
- 18 Xiaobo Wang, Guofeng Zhang, Ruiyun Chen *et al.*. Detection efficiency enhancement of single-photon detector at 1.55- $\mu\text{m}$  by using of single photons lock-in and optimal threshold[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2012, **44**(6): 1773~1775
- 19 K. Shimizu, T. Horiguchi, Y. Koyamada. Characterization and reduction of coherent fading noise in Rayleigh backscattering measurement for optical fiber and components[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(7): 982~987
- 20 Y. Takushima, Y. C. Chung. Optical reflectometry based on correlation detection and its application to the in-service monitoring of WDM passive optical network[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(9): 5318~5326
- 21 Yuncai Wang, Bingjie Wang, Anbang Wang. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(19): 1636~1638
- 22 Wang Anbang, Wang Yuncai. Chaos correlation optical time domain reflectometry[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2010, **40**(3): 512~518  
王安帮, 王云才. 混沌激光相关法光时域反射测量技术[J]. *中国科学 信息科学*, 2010, **40**(3): 512~518
- 23 Yang Congyuan, Wang Anbang, Wang Yuncai. Correlation optical fiber fault locator based on chaotic laser and its experimental application research[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0208002  
杨从渊, 王安帮, 王云才. 混沌激光相关法光纤断点定位仪及其应用的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0208002
- 24 Zhang Mingjiang, Liu Tiegeng, Zheng Jianyu *et al.*. Demonstration of ultrawideband chaotic signal generating utilizing external feedback laser diode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0405002  
张明江, 刘铁根, 郑建宇等. 利用光反馈半导体激光器产生超宽带混沌脉冲信号[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0405002
- 25 Katsuya Takegami, Naoki Tsutsumi, Wakao Sasaki. Chaotic dynamics in the optical feedback instabilities of 650 nm band red light semiconductor lasers and its control for noise reduction[C]. *Peppers of Technical Meeting on Electronmagnetic Theory*, 2007, 7~12