

# 混沌激光相关法光纤断点定位仪及其应用的 实验研究

杨丛渊 王安帮 张朝霞 王云才

(太原理工大学光电工程研究所, 山西 太原 030024)

**摘要** 提出并研制了一种与距离无关的等精度混沌激光相关法光纤断点定位仪。该光纤断点定位仪采用光反馈半导体激光器产生的宽带混沌激光作为光源,利用相关法实现对光纤网络反射事件的定位。测试结果表明,该光纤断点定位仪可实现 0.5 m 且与距离无关的等精度检测,其 4% 非涅耳反射光动态范围为 19.8 dB,灵敏度小于 -58 dB。

**关键词** 光学器件;断点检测;半导体激光器;混沌;光时域反射仪

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0208002

## Correlation Optical Fiber Fault Locator Based on Chaotic Laser and Its Experimental Application Research

Yang Congyuan Wang Anbang Zhang Zhaoxia Wang Yuncai

(Institute of Optoelectronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

**Abstract** A chaotic-laser-correlation fiber-network-faults locator is developed. Utilizing the broad bandwidth chaotic light emitted from a laser diode with optical feedback as the probe beam, it can locate the reflection events along fiber by the correlation characteristics of chaotic light. Measurement results show the faults locator can obtain 0.5 m range-independent spatial resolution, 19.8 dB dynamic range of 4% reflection and lower than -58 dB sensitivity.

**Key words** optical devices; faults location; semiconductor laser; chaos; optical time domain reflectometry

**OCIS codes** 140.5960; 140.1540; 120.4825

## 1 引 言

通过检测光纤链路上反射事件发现故障点位置是光通信网络维护的重要手段。目前,光时域反射仪(OTDR)<sup>[1,2]</sup>是最常用的光通信网络故障检测工具。然而,随着光通信技术的发展,光纤到大楼、光纤到街道、光纤到居民小区均已实现,信息高速公路最后 1 km 的电信终端最终也将被光纤到户(FTTH)所取代。在这些网络中存在大量的连接节点,为了节省维护时间和降低维护成本,这就要求高

分辨率光纤网络故障检测工具。

目前,提高测量精度的方法可分为超短光脉冲法<sup>[3]</sup>、低相干光干涉法<sup>[4]</sup>和随机信号相关法<sup>[5~8]</sup>。超短光脉冲法原理简单,可用宽带探测器直接探测,但信噪比较低,测量范围短。低相干光干涉法用短相干长度的连续光探测光纤,由干涉相长时的参考光程确定反射事件的位置,但其测量范围受限于参考光程的扫描范围。随机信号相关法利用伪随机码调制激光脉冲,可以利用增加码长来提高测量距离。

**收稿日期**: 2010-07-02; **收到修改稿日期**: 2010-09-15

**基金项目**: 国家自然科学基金(60908014)、山西省科技明星专项项目(09121007)、山西省科技攻关项目(20100321055-02)和山西省自然科学基金青年科技研究基金项目(2009021003)资助课题。

**作者简介**: 杨丛渊(1980—),男,硕士研究生,主要从事混沌相关光时域反射仪方面的研究。

E-mail: yang13530225118@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)

但是,伪随机码的码元宽度受限于电子带宽瓶颈,很难进一步提高测量精度。混沌激光相关法<sup>[9~14]</sup>则依据半导体激光器在受到适当的外界扰动时输出的具有良好随机性且码长不受限制的宽带混沌激光作为探测信号,结合相关法信号处理技术,可实现对传输线故障点的检测。这一技术突破了传统相关光时域反射仪电子信号带宽和码长的限制,为光纤网络提供了一种新型的高分辨率高精度损毁点探测技术。本文基于光反馈半导体激光器产生的宽带混沌激光,介绍了一种应用于光纤断点检测的混沌激光相关法光纤断点定位仪,并验证了该仪器可实现对光纤断点的高精度定位,同时测试了动态范围、空间分辨率和灵敏度等主要性能参数。

## 2 系统结构

混沌激光相关法光纤断点定位仪的系统结构如图 1 所示。虚线框中的混沌激光源是一个光反馈半导体激光器,光纤反射镜(FM)为激光器提供外光反馈,反馈光的强度和偏振态分别由可调光衰减器(VOA)和偏振控制器(PC)调节和控制。耦合器(OFC1)输出的混沌激光被 95:5 的耦合器(OFC2)分为两路:能量为 5% 的一路作为参考信号被光电

接收模块 1 (PD1) 光电转换和放大;能量为 95% 的一路作为探测光由光环行器(OC)输出到待测光网络,由待测光网络中的损毁点反射的回波信号由光电接收模块 2 (PD2) 光电转换和放大。参考信号和探测信号由带宽为 125 MHz,采样率为 500 MS/s 的数据采集卡(DCC)进行模数转换和存储后,由计算机(PC)控制采集卡和读取数据进行相关运算并显示结果。混沌激光相关法光纤断点定位仪各组件的主要技术指标如表 1 所示。由光网络中损毁点产生的回波信号很弱,往往被噪声所覆盖。因此,需要通过多次测量对相关曲线进行平均处理以改善信噪比。

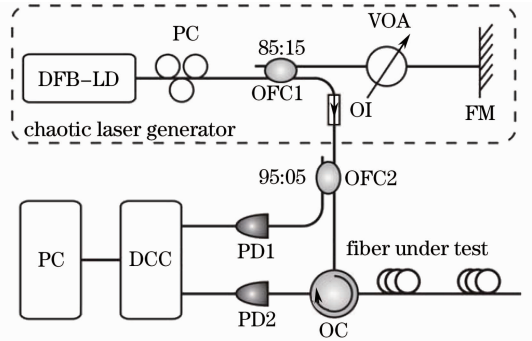


图 1 混沌激光相关法光纤断点定位仪结构  
Fig. 1 Structure of chaotic-laser-correlation fiber faults locator

表 1 混沌激光相关法光纤断点定位仪相关部件的主要参数

Table 1 Sub-part parameters of correlation optical fiber fault locator based on chaotic laser

Elemets	Parameters				
DFB-laser diode	Threshold current	Typical bias current	Typical emitting power	Central wavelength	Spectrum width
	22 mA	40 mA	2 mW	1553 nm	0.3 nm
Fiber mirror	Working wavelength	Working bandwidth	Reflectivity		
	1550 nm	±40 nm	95%		
Photo-detector	Operating voltage	Bandwidth	Conversion gain		
	5 V	125 MHz	1.5 V/mW		
Data capture card	Bandwidth	Sampling ratio	Memory capacity		
	125 MHz	500 MS/s	2 Mbit		

## 3 实验结果与分析

为了评估混沌激光相关法光纤断点定位仪的性能,测试了激光混沌源的特性并给出了光纤断点检测实例。对动态范围<sup>[15]</sup>、空间分辨率<sup>[16]</sup>和灵敏度等主要性能参数进行了实验分析。

### 3.1 混沌源特性

混沌源所用半导体激光器中心波长为 1553 nm, 阈值电流为 22 mA。当激光器偏置电流为阈值电流的 1.5 倍时,输出的探测光强度为 -2.2 dBm。调节

衰减器,在适当的反馈强度下,混沌源输出混沌激光。混沌源输出混沌激光的时序图、功率谱和自相关曲线如图 2 所示。时序图表明了混沌激光的非周期类噪声特性,功率谱显示混沌带宽约为 125 MHz。这是由于系统采集卡的带宽为 125 MHz,实际产生的混沌激光带宽远远大于 125 MHz。对应的自相关曲线如图 2(c) 所示,其半峰全宽(FWHM)为 5 ns,对应的空间分辨率为 0.5 m,旁瓣水平(PSL)约为 -14 dB。

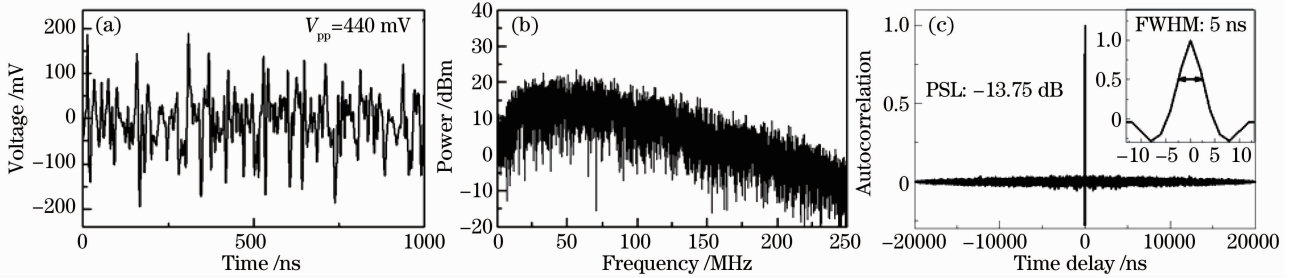


图 2 用于光纤网络断点检测的混沌激光时序图(a),功率谱(b)和自相关曲线(c)

Fig. 2 Time series (a), power spectra (b), autocorrelation trace (c) of chaotic signal employed in chaotic-laser-correlation fiber faults locator

### 3.2 测量实例

为了对混沌激光相关法光纤断点定位仪的断点检测效果有一个直观的了解,图 3 给出了长 48.8, 97.8 和 63.8 m 的三段光纤连接在一起时的测量结果,其平均次数为 50 次。从图中可以看出,前三个连接头在相关曲线上高度不一致,这是因为三个连接头的反射状态不同,但是三个连接头和光纤尾端均能被检测到。

### 3.3 动态范围

确定动态范围的方法为:用光纤断点定位仪测量长为 3.8 m 的可调光衰减器,衰减点位于光纤中部,调节衰减量并检测衰减器尾端的输出光功率,直到相关曲线刚好不能分辨衰减器尾端的反射事件为止。此时可调光衰减器引入的损耗即为光纤断点定位仪相对于光纤端面反射事件(反射率为 4%)的动态范围。当衰减器尾端的输出光功率分别为 -22.0 dBm 和 -23.0 dBm 时,光纤断点定位仪平均 100 次的相关曲线分别如图 4(a), (b) 所示。当衰减器引入 19.8 dB 的损耗时,3.8 m 处的反射峰强度与 0 m 处连接头对应的反射峰强度相近,可以清晰分辨,此时 1.8 m 处衰减点对应的反射峰最

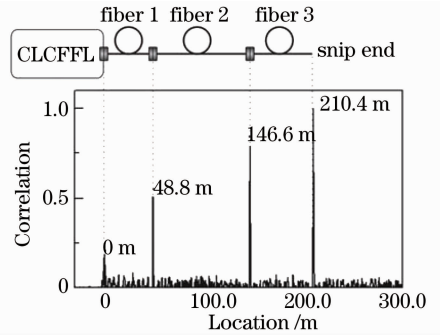


图 3 测量长为 48.8 m, 97.8 m 的两段光纤和长为 63.8 m, 尾端为剪断点的光纤连接在一起的相关曲线(平均 50 次)

Fig. 3 Average of 50 correlation traces when 48.8 m, 97.8 m and 63.8 m fibers are connected together with open snip end

强,如图 4(a) 所示;当衰减器引入 20.8 dB 的损耗时,0 m 处的连接头和 1.8 m 处的衰减点可清晰分辨,但 3.8 m 处的反射峰已被 6.2 m 处的噪声所淹没,如图 4(b) 所示。因此光纤断点定位仪的动态范围为 19.8 dB。需要指出的是,这一数值是在探测光强度为 -2.2 dBm 下得到的,若增加混沌源的发射功率,将会大大增加该系统的动态范围。

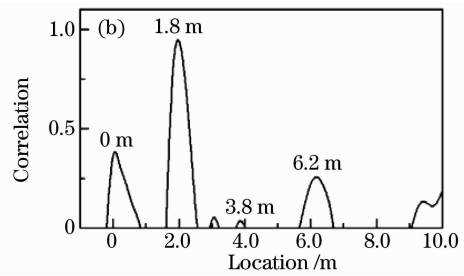
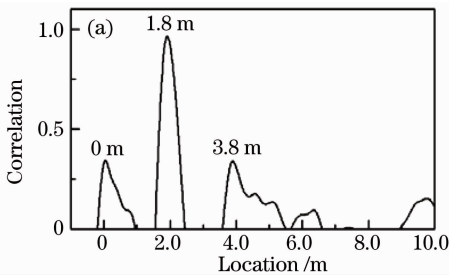


图 4 测量长为 3.8 m, 衰减点位于中部的可调光衰减器的相关曲线(平均 100 次)。(a) 衰减 19.8 dB, (b) 衰减 20.8 dB

Fig. 4 Average of 100 correlation traces when a 3.8-m variable optical attenuator with attenuation point in the middle of it is measured. (a) 19.8 dB attenuation, (b) 20.8 dB attenuation

### 3.4 分辨率

3.1 节提到由混沌激光的自相关曲线可知该光纤断点定位仪可实现 0.5 m 且与距离无关的空间分

辨率。为了验证它的距离无关性,用光纤断点定位仪测量长度约为 68 km 的光纤,测量结果如图 5(a) 所示,相关曲线的峰值出现在 0 m 和 68156.2 m 处,表

明光纤断点定位仪能够检测出光纤连接位置和光纤尾端。为了确定远距离下的空间分辨率,放大光纤尾端的反射峰如图 5(b)所示。从图中可以看出,光纤尾端 68 km 处反射峰的半峰全宽仍为 0.5 m,

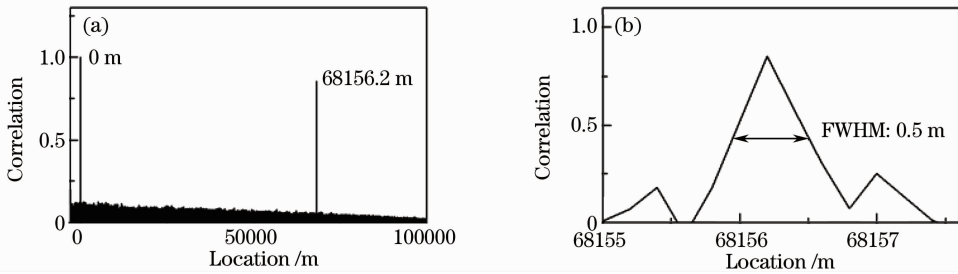


图 5 测量长度为 68 km 光纤的相关曲线(平均 50 次)。(a)整体图,(b)光纤尾端局部放大图

Fig. 5 Average of 50 correlation traces when a 68-km fiber with open end is measured. (a) correlation trace, (b) the details at end of measured fiber

### 3.5 灵敏度

将尾纤长为 1.4 m,耦合比为 50:50 的光纤耦合器的一输入端接入光纤断点定位仪,光纤耦合器的两输出端分别连接两个光隔离器,另一输入端连接一个灵敏度为 -60 dBm 的光功率计测量耦合器和光衰减器的反射光强度。此时光功率计显示结果为零,即不能读取反射光功率。然而,光纤断点定位仪平均 100 次的相关曲线可以清楚分辨光纤耦合器末端连接头,如图 6 中 2.8 m 处的反射峰,同时位于 0 m 的连接头,1.4 m 处的熔接点也能分辨。因此,受限于所用光功率计的灵敏度,只能确定该光纤断点定位仪的灵敏度低于 -58 dB。

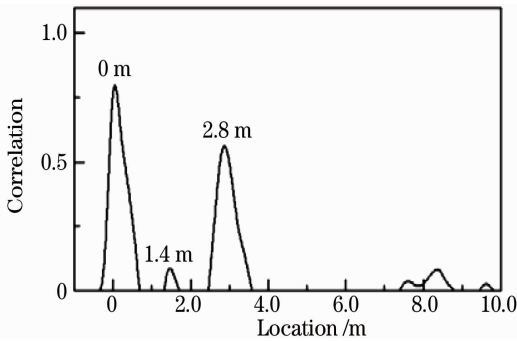


图 6 测量尾纤长为 1.4 m,耦合比为 50:50,输出端分别连接两隔离器的光纤耦合器的相关曲线(平均 100 次)

Fig. 6 Average of 100 correlation traces when a 50:50 optical fiber coupler with a 1.4-m pigtail and two output terminals connected to two optical isolators respectively is measured

## 4 结 论

开发了一种面向光纤网络断点检测的混沌激光相关法光纤断点定位仪。该系统采用光反馈半导体

说明该系统的空间分辨率与测量距离无关,其值为 0.5 m。需要指出的是这一结果受限于采集卡的带宽,如果将带宽提高至 500 MHz,空间分辨率可达到 6 cm<sup>[11]</sup>。

激光器产生的宽带混沌激光作为光源,利用相关法可实现对光纤网络反射事件的定位。测试结果表明,该光纤断点定位仪可实现 0.5 m 且与距离无关的等精度检测,其 4% 菲涅耳反射动态范围为 19.8 dB,灵敏度小于 -58 dB。

### 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. Instrumentation principles for optical time domain reflectometry[J]. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1986, **19**(5): 334~341
- 3 M. Legré, Rob Thew, Hugo Zbinden *et al.*. High resolution optical time domain reflectometer based on 1.55  $\mu\text{m}$  up-conversion photon-counting module[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(13): 8237~8242
- 4 Wayne V. Sorin, Mountain View, Calif. Optical low-coherence reflectometer using optical attenuation[P]. US Patent 5365335, 1994
- 5 Maurizio Zoboli, Paolo Bassi. High spatial resolution OTDR attenuation measurements by a correlation technique[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(23): 3680~3681
- 6 Moshe Nazarathy, S. A. Newton, R. P. Giffard *et al.*. Real-time long range complementary correlation optical time domain reflectometer[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(1): 24~38
- 7 Keith R. Jones, Gilberto Isaac Sada Treviño, Ragnar H. Jonsson *et al.*. Sequence time domain reflectometer using complementary Golay codes[P]. US Patent 6885954 B2, 2005
- 8 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
- 9 Fanyi Lin, Jiaming Liu. Chaotic lidar[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2004, **10**(5): 991~997
- 10 Fanyi Lin, Jiaming Liu. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(6): 815~820
- 11 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

- 12 Bingjie Wang, Yuncai Wang, Linqin Kong *et al.*. Multi-target real-time ranging with chaotic laser radar[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(11): 868~870
- 13 Gong Tian'an, Wang Yuncai, Kong Linqin *et al.*. Chaotic lidar for automotive collision warning system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2426~2430  
龚天安, 王云才, 孔令琴 等. 面向汽车防撞的混沌激光雷达[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2426~2430
- 14 Han Guohua, Wang Yuncai. Faults location for transmission lines by using chaotic laser signal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2020~2024  
韩国华, 王云才. 基于混沌激光的传输线断点测量[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2020~2024
- 15 Yue Lei. Dynamic range measurement of optical time domain reflectometer [J]. *Telecommunications Network Technology*, 2005, (11): 63~66  
岳蕾. 光时域反射计动态范围测试[J]. *电信网技术*, 2005, (11): 63~66
- 16 Harald Geiger, John P. Dakin. Low-cost high-resolution time-domain reflectometry for monitoring the range of reflective points [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1282~1288