

文章编号: 1005-5630(2014)05-0449-06

## 基于混沌信号的光时域反射仪

王云才<sup>1,2</sup>, 张建国<sup>1,2</sup>, 徐 航<sup>1,2</sup>, 王安帮<sup>1,2</sup>

(1. 太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部/山西省重点实验室, 山西 太原 030024;  
2. 太原理工大学 物理与光电工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 研制了基于混沌信号相关测距技术的光时域反射仪样机。介绍了该仪器的混沌光源设计, 硬件系统结构设计和软件算法流程设计。以 G. 652. B 单模光纤为被测对象, 对该仪器检测光纤故障的技术指标进行了分析测试。测试结果表明, 在 102 km 内可实现与距离无关的 50 cm 空间分辨率, 比现有飞行时间测量技术提高了约两个数量级, 可实现对光纤不同类型反射事件的识别, 完全满足无源光网络中的故障检测。

**关键词:** 光时域反射仪; 混沌激光; 相关; 半导体激光器

**中图分类号:** TH 74 **文献标志码:** A **doi:** 10. 3969/j. issn. 1005-5630. 2014. 05. 016

### Optical time domain reflectometer based on the chaotic signal

WANG Yuncai<sup>1,2</sup>, ZHANG Jianguo<sup>1,2</sup>, XU Hang<sup>1,2</sup>, WANG Anbang<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** An optical time domain reflectometer based on chaotic signal correlation ranging technology (COTDR) is designed and developed. The chaotic light source, hardware configuration and software design of the system are presented. By using G. 652. B single mode fiber as the test object, technical specifications of the COTDR for fiber fault location are tested. Measured results show that the COTDR can realize a range-independent resolution of 50 cm within at least 102 km, which is raised by about two orders of magnitude compared with the existing flight time measurement technology. Furthermore, it can realize the recognition of the different reflection events in the fiber and meet a requirement of fault location in the passive optical network.

**Key words:** optical time domain reflectometer; chaotic laser; correlation; laser diode

### 引 言

光时域反射仪(optical time domain reflectometer, OTDR)在光纤光缆线路施工、维护测试及抢修过程中是必不可少的专用测试仪器。它采用时域测量方法, 将光脉冲发射入待测光纤, 通过观测光纤后向瑞利散射信号, 探测光纤沿传播方向的衰减特性, 进而检测、判断链路中的异常。随着小型光纤网络的飞速发展, 如建

收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(61205142, 60908014); 山西省自然科学基金(2013011019-3, 2012021013-2)

作者简介: 王云才(1965-)男, 教授, 博士, 主要从事混沌信号的产生及应用方面的研究。E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

通讯作者: 张建国(1979-)男, 讲师, 博士, 主要从事混沌光/电时域反射仪方面的研究。E-mail: zhangjianguo@tyut.edu.cn

建筑物内的光纤入户网络及大型飞行器系统内的光纤链路,OTDR 正面临新的挑战,如更高的空间分辨率和测量精度等。传统单脉冲 OTDR<sup>[1]</sup>通过向被测光纤中发射一个光脉冲并探测其回波脉冲的到达时间和功率,检测光纤链路的故障点及光纤的衰减特性。其测量精度取决于脉冲宽度,同时也受到计时误差的影响,通常为米量级,且随距离增大而降低。采用超短光脉冲或者其他光学技术可以提高测量精度和信噪比<sup>[2-3]</sup>,但都无法克服测量精度和测量距离不能同时提高的矛盾。相关法光时域反射仪(correlation optical time domain reflectometer, correlation-OTDR)<sup>[3-4]</sup>利用一定码长的随机光脉冲序列作为探测光,通过对后向瑞利散射信号和随机码进行相关计算实现光纤检测。该方法可通过增加码长的方式,增大测量距离,且不会影响空间分辨率。然而受限于电子带宽瓶颈,与单脉冲 OTDR 相比,correlation-OTDR 的空间分辨率并未得到明显改善。此外,有限的码长也限制了其动态范围或测量距离的进一步增加。

半导体激光器在光反馈或光注入时可产生强度随机变化的混沌激光,其带宽取决于激光器的弛豫振荡而达到数吉赫(GHz)<sup>[6]</sup>,而且自发辐射噪声的影响加上混沌的初值敏感性,使得混沌激光的波形是一种物理层的随机信号,不存在伪随机序列的周期循环问题。即混沌激光波形具有与伪随机码相似但性能更优的相关曲线<sup>[7]</sup>。研究表明,借鉴随机码相关法提出的混沌光时域反射仪(chaotic optical time domain reflectometer, COTDR)<sup>[8]</sup>具有如下优点:(1)混沌激光的带宽突破电子瓶颈,可达到厘米级的测量精度;(2)利用混沌激光的内禀性,可实现长距离的等精度测量,克服了传统 OTDR 的测量精度随测量距离增大而降低的矛盾;(3)利用混沌激光的随机性,突破了 correlation-OTDR 中无模糊测量受码长的限制;(4)结构简单。实现高精度测量的超宽带混沌激光,其产生无需超短脉冲激光器,也无需高速伪随机码发生器和外调制器。

本文介绍了自行研制的 COTDR 的系统设计构成和参量,并用该样机对光纤断点故障进行了测试,对整个系统性能进行了分析测试。

## 1 COTDR 系统

### 1.1 技术原理

COTDR 的技术原理如图 1 所示。半导体激光器和外反射镜构成一个非线性动力学系统,其输出状态取决于半导体激光器的偏置电流、反馈光的强度和相位。在适当的工作条件下,外光反馈半导体激光器构成混沌激光源,输出强度随机变化的宽带混沌激光。混沌激光由耦合器分为探测光和参考光。探测光经过光环行器入射到被测光纤中,经故障点反射后返回发射端。故障点的回波信号与参考信号由两个性能相同的快速光电探测器转化为电信号,由相关器或单片机处理实现互相关运算;通过测定相关曲线峰值的延迟时间计算出故障点的位置。

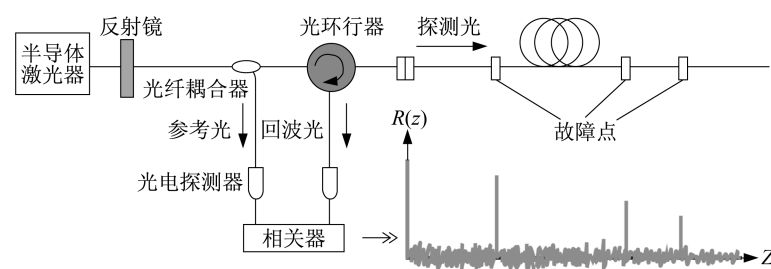


图 1 COTDR 原理示意图

Fig. 1 Schematic of the COTDR

### 1.2 系统结构设计

研制的 COTDR 样机实物如图 2 所示。整体样机系统包括硬件和软件两大部分,其总体系统结构框图如图 3 所示。下面分别对硬件系统结构和软件系统功能进行描述。

#### 1.2.1 硬件系统设计

硬件系统主要由激光器、光反馈系统、激光器监控、光接收系统、中央处理和存储器以及数据采集与

显示系统等部分组成。

硬件系统中的激光器、外光反馈系统和激光器监控共同组成混沌激光源,其具体结构如图4所示。选择输出波长为1550 nm,输出功率为10 mW的分布反馈式半导体激光(DFB-LD)作为光源,由激光器监控系统为半导体激光器提供驱动电流和控制温度,并实时监测其输出功率和工作温度;选择光纤反射镜提供反馈光,反馈光的强度由可调光衰减器调节,反馈光的偏振匹配由偏振控制器控制。最后,光放大器对混沌激光进行放大。



图2 COTDR 样机实物图

Fig. 2 The prototype of the COTDR

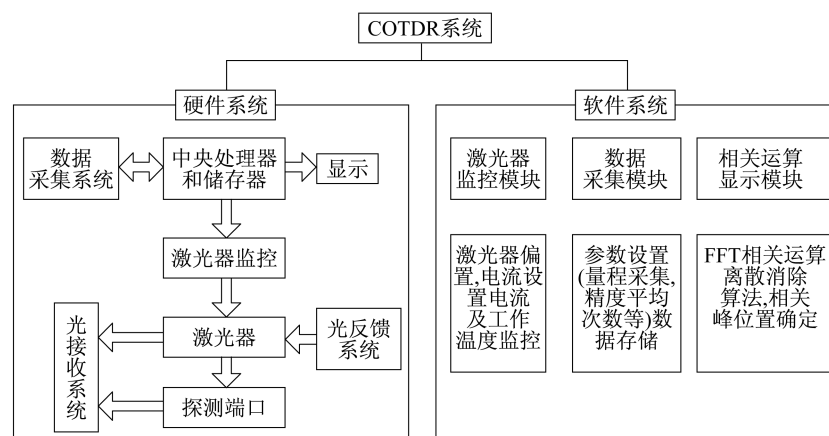


图3 COTDR 系统结构框图

Fig. 3 The framework of the COTDR system

硬件系统设计中的探测端口(FC/PC型光纤连接器)用于连接被测光纤,发射探测光并接收反射点回波,探测功率为17.8 dBm;选择带宽120 MHz,灵敏度-37 dBm,效率0.16 V/mW的PIN+TIA型的两个光电探测器作为光接收系统将探测回波和参考光转换为电信号,经前置放大后输入数据采集系统。选择工控机作为中央处理器,控制激光器驱动和监控系统、数据采集系统和显示系统3个单元。数据采集系统将数据传输至内部存储器;处理器调取内存中数据进行相关运算,并将结果由触摸液晶屏显示。

### 1.2.2 软件系统设计

COTDR 软件系统设计中,主要基于 Visual Basic 平台设计了配套软件。该软件系统包括激光器监控、数据采集存储和相关运算及显示三大模块。激光器监控模块主要完成激光器偏置电流设置、电流及工作温度监控功能。数据采集存储模块完成对采集系统的参数设置和数据存储功能。采集参数可在显示界面内设置,其默认值为双通道模式、带宽125 MHz、采样率500 MS/s、存储深度16 kB、灵敏度10 mV/div。相关运算及显示模块实现测量控制,相关运算,平均次数设置,剩余次数显示,相关曲线实时显示、缩放、保存,故障点位置显示等功能。数据采集与处理的流程如图5所示。

由于混沌信号的随机性,混沌信号相关曲线的固有噪声不可避免。所以在数据处理中特意设计了平均离散消除方法<sup>[9]</sup>,对相关运算结果进行后处理,可以显著提高信噪比。本质上,多次测量取平均等效于增大探测信号的能量,从而提高信噪比。平均运算之后,再进行离散消除法降低混沌信号相关曲线的固有噪声,信噪比进一步被提高,原来淹没在噪声中的弱反射响应也可被清晰探测。

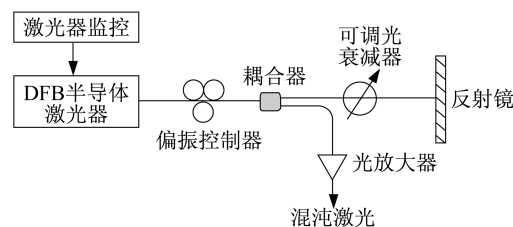


图4 混沌激光源

Fig. 4 The chaotic laser source

## 2 实验结果

### 2.1 混沌激光

当反馈腔长为 5.3 m、反馈强度为 -9.2 dB 时,混沌激光光源产生混沌信号的时序、相图、功率谱和自相关曲线如图 6 所示。图 6(a) 表明混沌信号的波形呈现快速随机起伏;功率谱显示其频谱宽而平坦,能量可延伸至 10 GHz。混沌信号的自相关曲线具有  $\delta$  函数形式,其半高全宽(full width at half maximum, FWHM) 如图 6(c) 中的插图所示为 5 ns。注意该值受限于 125 MHz 的采集带宽,FWHM 的理论值可以小于 0.1 ns。

### 2.2 光纤断点测量实例

下面给出以光纤断点为反射事件对象的测量实例。图 7 为双反射事件的测量显示界面(单次测量),背景界面为采集信号的控制和显示界面,其中的上下两条曲线分别显示了混沌参考信号和回波信号的波形。中间小界面(可拖动、放大)直观地给出了相关曲线,并在峰值处显示距离,两个峰值清晰地显示故障点分别位于 10 120.6 m 和 34 051.4 m 处;右边控件部分可设置量程、平均次数,并显示断点个数及相应的位置。

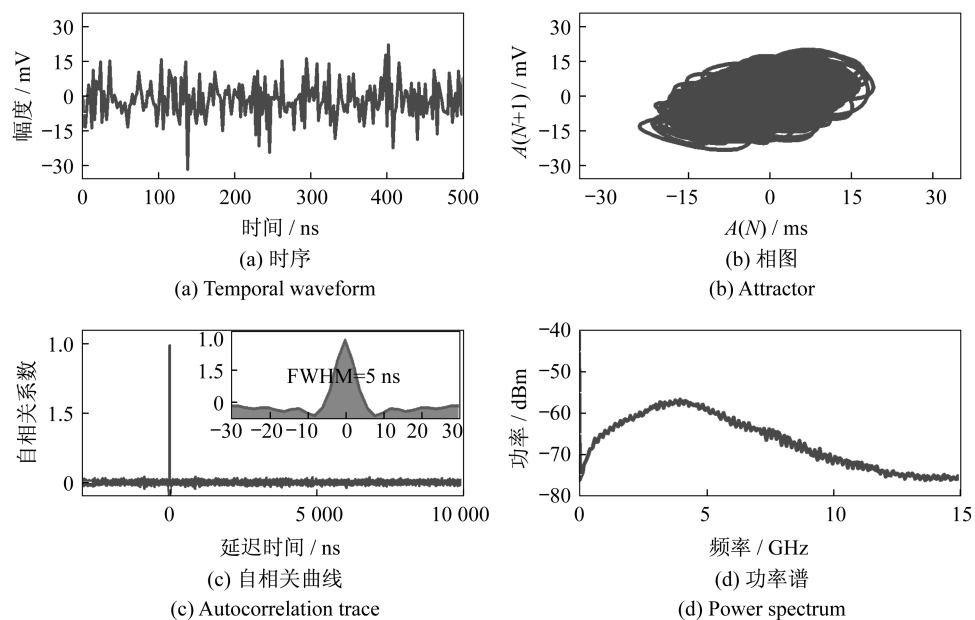


图 6 混沌激光的特性

Fig. 6 Properties of the chaotic laser

实验测试中设计了不同的光纤断点类型,以检验 COTDR 对不同特征反射事件的辨别能力。利用光纤连接器将 3 段不同长度的光纤连接在一起,其中第三段光纤的尾端利用光纤刀斜切,构成斜切断点。图 8(a) 是斜切断点的检测结果,其位置为 210.4 m。图中另外 3 个峰值分别代表包括发射端在内的 3 个光纤连接头的反射,由其位置可以测量出 3 段光纤的长度。测量结果是以断点反射峰值进行归一化的。进一步,在此切断点前约 2 m 处将光纤折断,结果如图 8(b) 所示,折断点的位置为 208.6 m。对比两图所示结果,折断点的反射强度远低于切断点,由此可以区别不同反射事件的类型。

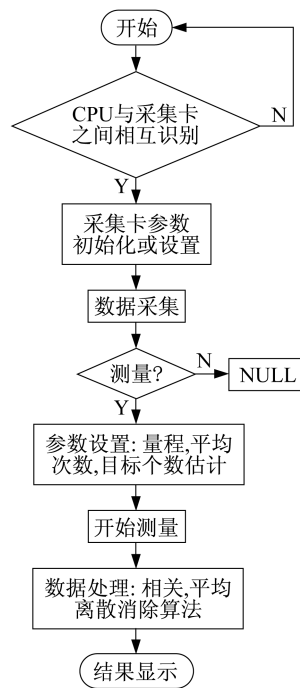


图 5 系统操作流程

Fig. 5 Operational process flow diagram of the system

### 2.3 系统性能指标测试

以 G. 652. B 单模光纤为被试对象,得到利用混沌光时域反射仪进行光纤断点检测的技术指标,如表 1 所示。由技术指标可见,采用带宽为 120 MHz 的数据采集卡实现数据采集,对光纤断点检测可在 102 km 内实现与距离无关的 50 cm 空间分辨率,如图 9 所示。该值受限于采集卡的带宽而无法充分利用混沌激光的高带宽实现更高精度的测量。若采用带宽为 500 MHz 的数字示波器进行数据采集,则空间分辨率可提高至 6 cm<sup>[10]</sup>,比目前技术提高约两个数量级,完全满足无源光网络中的故障检测。

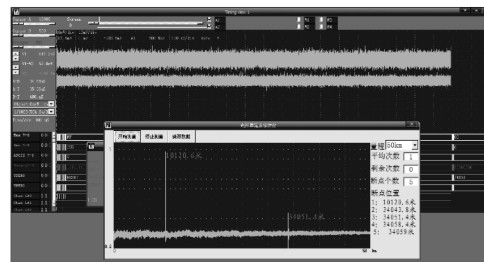


图 7 双反射事件测量显示界面

Fig. 7 Display interface of the dual-reflection events measurement

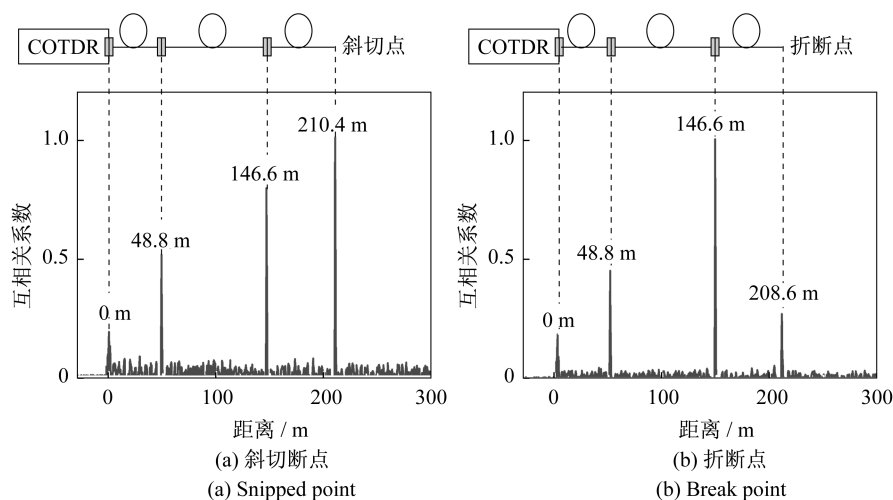


图 8 断点和连接点的测量结果

Fig. 8 The result of the fiber connection points and breakpoint measured by the COTDR

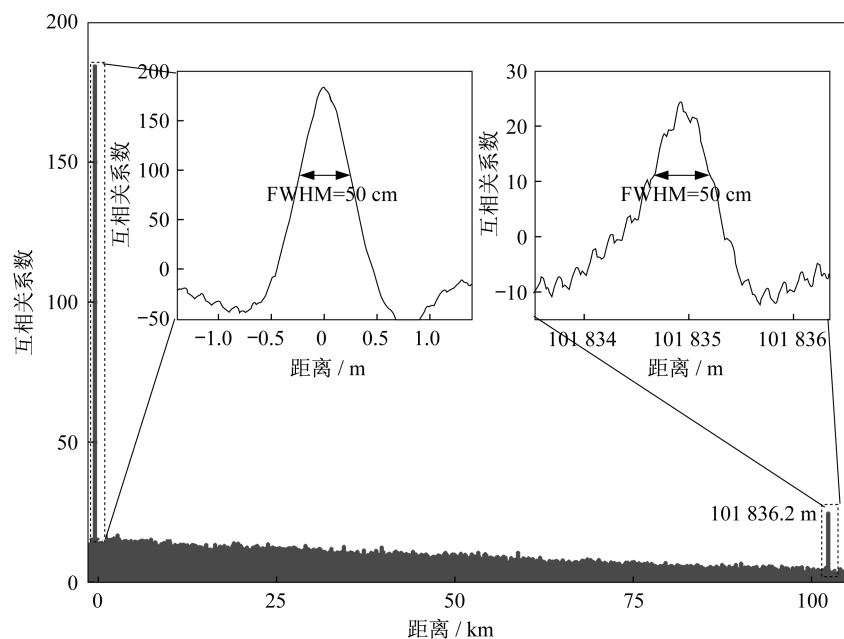


图 9 102 km 的光纤断点检测结果以及与距离无关的 50 cm 空间分辨率

Fig. 9 The results of the fiber breakpoint at 102 km measured by the COTDR and a range-independent spatial resolution of 50 cm

表 1 COTDR 的技术指标  
Tab. 1 Technical indicators of COTDR

指标	参数	说明
空间分辨率/cm	6@0.5 GHz, 50@0.12 GHz	与测量距离无关的等精度测量
精度/cm	±3@0.5 GHz, ±25@0.12 GHz	与测量距离无关的等精度测量
动态范围/dB	20	
最大测距范围/km	102	-30 dB 回波的断点

### 3 结 论

研制了利用宽带混沌半导体激光器作为光源的 COTDR, 实现对光纤网络故障点的探测与定位。对该系统的硬件系统设计、软件功能和流程进行了详细描述, 并以 G. 652. B 单模光纤为被试对象, 对利用该仪器实现光纤断点检测的技术指标进行了分析测试。测量结果表明, 该仪器可在 102 km 探测范围内实现 50 cm 的空间分辨率, 且空间分辨率与反射事件位置无关。

### 参考文献:

- [1] HEALEY P. Instrumentation principles for optical time domain reflectometry[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1986, 19(5): 334-341.
- [2] TATEDA M, HORIGUCHI T. Advances in optical time-domain reflectometry[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(8): 1217-1224.
- [3] LEGRE M, THEW R, ZBINDEN H, et al. High resolution optical time domain reflectometer based on 1.55 μm up-conversion photon-counting module[J]. *Optics Express*, 2007, 15(13): 8237-8242.
- [4] JONES K R, TREVINO G I S, JONSSON R H. Sequence time domain reflectometry using complementary Golay codes; US, 6885954 [P], 2005-04-26.
- [5] TAKUSHIMA Y, CHUNG Y C. Optical reflectometry based on correlation detection and its application to the in-service monitoring of WDM passive optical network[J]. *Optics Express*, 2007, 15(9): 5318-5326.
- [6] WANG A B, WANG Y C, HE H C. Enhancing the bandwidth of the optical chaotic signal generated by semiconductor laser with optical feedback[J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2008, 20(19): 1633-1635.
- [7] LIN F Y, LIU J M. Diverse waveform generation using semiconductor lasers for radar and microwave applications[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(6): 682-689.
- [8] WANG Y C, WANG B J, WANG A B. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode[J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2008, 20(19): 1636-1638.
- [9] 王云才, 马建议, 韩晓红, 等. 混沌激光相关法测距系统的信号采集与处理[J]. *应用光学*, 2011, 32(3): 568-573
- [10] WANG A B, WANG N, YANG Y B, et al. Precise fault location in WDM-PON by utilizing wavelength tunable chaotic laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(21): 3420-3426.