

# 放大自发辐射光源结合相关法实现 无源光网络故障检测

刘艳阳<sup>1</sup> 杨玲珍<sup>1,2</sup> 王斐斐<sup>1</sup> 陈曦<sup>1</sup> 张朝霞<sup>1</sup> 王娟芬<sup>1</sup> 刘香莲<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024  
<sup>2</sup> 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** 提出了一种基于掺铒光纤放大自发辐射(ASE)光源实现波分复用无源光网络(WDM-PON)故障检测的技术。WDM-PON因其具有节点密、支路多的结构特点导致光纤链路中故障检测困难,该技术利用双程后向结构掺铒光纤 ASE 光源光谱的宽带特性和具有 delta 相关特性的时域输出,结合相关法实现分辨率为厘米量级的 WDM-PON 光纤链路故障点定位。以 8 通道 WDM-PON 为例进行检测,结果表明该方法能够精确定位光网络中断点及松动接头的位置,并实现多故障反射事件检测。实验中获得动态范围为 23 dB,分辨率达到 4 cm,测量精度与测量距离无关。基于 ASE 光源的宽带特性,该技术至少可完成对 32 路的 WDM-PON 故障检测。

**关键词** 光通信;故障定位;相关法;波分复用无源光网络;放大自发辐射源

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0805004

## Link Fault Detection in Passive Optical Networks Based on Correlation Method Combined with an Amplified Spontaneous Emission Source

Liu Yanyang<sup>1</sup> Yang Lingzhen<sup>1,2</sup> Wang Feifei<sup>1</sup> Chen Xi<sup>1</sup>  
Zhang Zhaoxia<sup>1</sup> Wang Juanfen<sup>1</sup> Liu Xianglian<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China  
<sup>2</sup> Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

**Abstract** The fault detection technique for the wavelength division multiplexing passive optical network (WDM-PON) is proposed based on an erbium-doped fiber amplified spontaneous emission (ASE) source. It is quite difficult to the link fault detection because of the multi-branch and node density structure of WDM-PON. The technology utilizes the broadband characteristics of the erbium-doped fiber ASE source with the double-pass backward configuration and the delta correlation properties of the time-domain output. It can solve the problem in the WDM-PON fault detection of fiber links. In the experiments, the detection of 8 channels WDM-PON can accurately locate the fiber breakpoint, the joint looseness, and multi-fault reflection. The results show that the 23 dB dynamic range and 4 cm spatial resolution which is independent to the measuring distance are realized. The technology is able to achieve the detection of the WDM-PON faults with 32 channels based on the broadband characteristics of the ASE source to realize WDM-PON fiber link fault location with centimeter resolution.

**Key words** optical communications; fault location; correlation; wavelength division multiplexing passive optical network; amplified spontaneous emission

**OCIS codes** 060.2330; 060.4261; 060.2410; 120.4825

收稿日期: 2014-01-24; 收到修改稿日期: 2014-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(61107033)、山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划(2012lfjyt05)

作者简介: 刘艳阳(1989—),男,硕士研究生,主要从事放大自发辐射光源用于波分复用无源光网络故障检测方面的研究。E-mail: liuyanyang899110@126.com

导师简介: 杨玲珍(1973—),女,教授,主要从事光纤激光技术与应用等方面的研究。

E-mail: office-science@tyut.edu.cn(通信联系人)

## 1 引言

波分复用无源光网络(WDM-PON)早在1994年由RiteNet所在的贝尔实验室提出<sup>[1]</sup>,它是在原有的树形拓扑结构中引入波分复用技术,旨在不改变原来物理设备的基础上提高传输容量。近年来,随着WDM-PON技术的不断完善<sup>[2]</sup>和器件价格的不断下降,被认为是下一代高宽带接入网的发展方向 and 最终解决方案<sup>[3]</sup>。但在传输容量提高和距离增加的同时,WDM-PON网络维护问题变得尤为突出。

光时域反射技术(OTDR)是目前用于光缆线路故障检测的主要技术<sup>[4-5]</sup>,它利用光纤中的后向瑞利散射和非涅耳反射来检测光纤特性。由于波分复用器的存在,传统的OTDR只能采用分段检测的方法,无法实现WDM-PON实时测量。波长可调谐技术<sup>[6]</sup>为解决WDM-PON实时测量问题提供了解决途径<sup>[7-8]</sup>,1997年波长可调谐的OTDR用于WDM-PON网络监测研究<sup>[9]</sup>,采用法布里-珀罗(FP)半导体激光器(LD)的注入锁定<sup>[10]</sup>,将可调谐激光器作为光源,通过对光源进行脉冲调制,用于WDM-PON网络检测的波长可调OTDR研究<sup>[11]</sup>。然而传统的脉冲时间飞行法存在原理缺陷,其测量距离与空间分辨率存在无法调和的矛盾:要提高空间分辨率和减小事件盲区,需要缩短脉冲的宽度,这将导致脉冲能量降低,进而减少可测量距离。虽然混沌相关法的波长可调谐的OTDR能够实现波分复用网络实时测量<sup>[12-13]</sup>,但由于FP激光器输出的纵模间隔和阵列波导光栅(AWG)信道间隔不匹配,很难实现波长连续可调谐,从而限制了测量链路的数量,无法检测结构复杂的WDM-PON。光纤故障可视的混沌光时域反射测量方法<sup>[14]</sup>可以实现光纤中单、多故障点的可测可视化定位,但受动态范围的限制无法实现长距离光纤故障检测。对于WDM-PON网络实时监测,研究者提出利用在网络中传输数据进行相干探测和相关探测<sup>[15-16]</sup>,但利用数据进行在线检测对下行和上行的数据将带来干扰,影响网络服务质量。

近年来有研究者提出利用掺铒光纤(EDF)放大自发辐射(ASE)源的宽带特性,对WDM-PON中光纤故障进行检测。这种方案需要在每个用户单元(ONU)处设置一个中心波长不同的布拉格光栅(FBG)<sup>[17-19]</sup>,利用光谱仪监测返回波长或功率计测量返回波长的功率进而判断通道故障。这种技术只能检测故障线路而不能对故障点进行定位,因而技术人员无法对故障线路进行快速修复。同时因为在每个ONU处放置一个FBG,增加了网络的复杂性

和运营成本。

基于掺铒光纤 ASE 源的随机噪声具有很好的相关特性和宽带可调谐特性<sup>[20-22]</sup>,本文提出一种用于WDM-PON光纤链路的故障检测技术,ASE光源结合相关法实现WDM-PON光纤故障点精确定位,实验对WDM-PON故障点、动态范围和分辨率进行了检测分析。结果表明该技术能够实现厘米量级的分辨率且测量精度与探测距离无关。

## 2 实验装置

实验装置如图1所示,980 nm 半导体激光器输出的抽运光通过波分复用(WDM)器进入8 m长的掺铒光纤、反射率为81%的光纤反射镜(FLM)和光纤隔离器(ISO),组成ASE光源(见线框A)。从隔离器输出宽带的ASE光经波长可调谐的滤波器滤波,通过观察光谱分析仪(OSA),调节可调谐的滤波器使其输出波长与WDM-PON各通道的中心波长相一致,经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后进入95:5的耦合器(OC)分为两路:一路(95%)作为探测信号经过环形器输入到WDM-PON,另一路(5%)作为参考信号,探测光的回波信号和参考光信号经过两个参数相同的光电探测器(PD-1, PD-2, 带宽1 GHz)输入到数字处理系统(DPS),组成检测装置(见线框B)。将两路信号进行实时采集和互相关运算即可精确定位故障点位置。实验中使用的数字示波器(OSC)型号为Lecroy SDA8Zi-A,其最大带宽为6 GHz,最大采样率为40 GS/s。

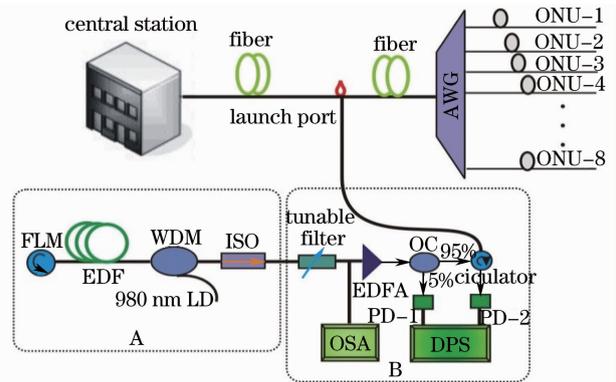


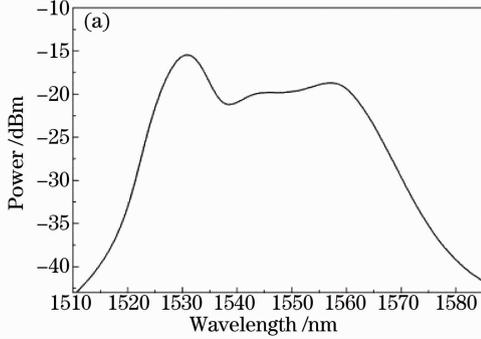
图1 实验装置图

Fig. 1 Experiment setup

## 3 放大自发辐射光源与实验原理

实验中采用掺铒光纤 ASE 光源的双程后向结构,优化掺铒光纤长度,当抽运电流为304.7 mA时 ASE光源输出的光谱如图2(a)所示,可用光谱带宽

(1525~1565 nm)约达 40 nm,覆盖通信波段 C 波段,波长可调谐范围可实现至少 32 路的 WDM-PON 故障检测。实验中 8 通道的 AWG 波长范围为 1551.62~1558.32 nm,通道间隔为 0.8 nm,此波段光谱平坦度不大于 1 dB。ASE 输出的光谱通



过光滤波器调节与实验中 AWG 的 8 路通道匹配输出的光谱如图 2(b)所示,结合图 2(a)可以看出与 AWG 相匹配波段的光谱幅度十分平坦,这样有利于提高实验中通道间检测的稳定性。

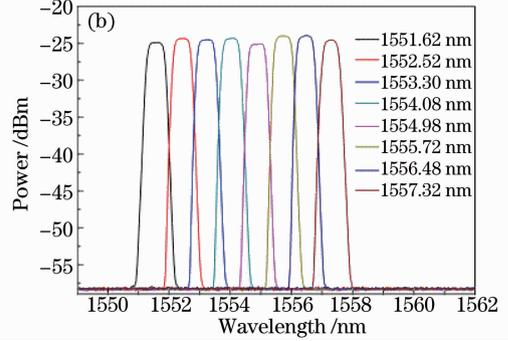


图 2 (a) EDF 宽带 ASE 光源光谱图; (b) 8 通道 AWG 波长范围为 1551.62~1557.32 nm 时滤波图

Fig.2 (a) Output spectrum from the EDF broadband ASE source; (b) optical filtering spectra of 8 channels from 1551.62 nm to 1557.32 nm with spacing of 0.8 nm

宽带 ASE 光源经滤波器滤波后输出波长为 1557.32 nm 的时序图和自相关曲线如图 3 所示,自相关曲线图 3(b)具有类似于  $\delta$  函数的线形,相关峰的半峰全宽(FWHM)为 4 cm。输出的单一波长的参考信号与携带延时信息的探测信号的互相关函数也具有此性质,因此可以通过参考信号和探测信号的相关运算定位反射事件的位置。设参考信号  $x(t)$ ,探测信号满足函数关系式  $k \cdot x(t - \tau)$ ,其中  $k$

是光在传输过程中的损耗系数, $\tau$  为探测信号相对与参考信号的延时,两信号的互相关函数表达式表示为

$$x(t) \otimes k \cdot x(t - \tau) \approx k \cdot \delta(\tau). \quad (1)$$

相关曲线中  $\tau$  时刻位置有对应的相关峰,即可确定待测的目标距离为  $\frac{c \cdot \tau}{2n}$ ,其中  $c$  为光速, $n$  为传输介质的折射率,由此可以实现精确故障点定位。

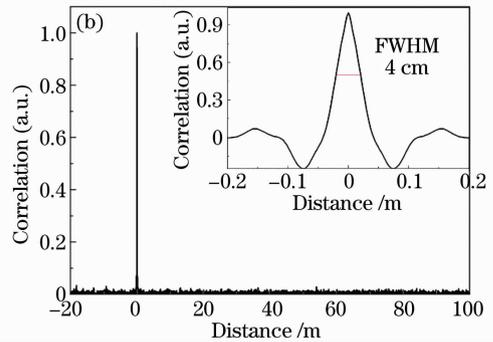
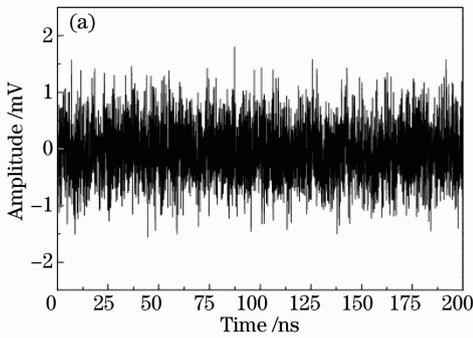


图 3 1557.32 nm 波长信号。(a) 时序图;(b) 自相关曲线

Fig.3 Signal of wavelength 1557.32 nm. (a) Time-domain waveform; (b) auto-correlation trace

#### 4 波分复用无源光网络故障检测结果

实验中对 WDM-PON 8 通道依次进行检测,同时进行单路多故障事件的检测。将不同长度的传输光纤接入 WDM-PON 网络结构。检测之前选定参考零点位置,通过分析相关曲线,参考相关峰的位置在参考光路补偿一段光纤跳线,即自 OC-1 输出的 5%参考信号到光电探测器 PD-1 与 95%探测信号

经零点反射回 PD-2 所用时间相同,如图 1 所示零点位置为 launch port。

在接入 WDM-PON 前对传输光纤进行了测量,两段不同长度的光纤检测结果如图 4(a)所示,launch port 后显示了两个相关峰的精确位置为 2994.12 m 和 23689.37 m。接入 WDM-PON 后,通过调节滤波器与 AWG 通道匹配滤波后进行检测,1553.30 nm 和 1557.32 nm 通道的测试结果如

图 4(b)、(d) 所示, AWG 出现在距 launch port 718.18 m 位置处, 光纤尾端和 PC/APC(FC/PC 接头与 FC/APC 接头相连) 接头相应位置也显示出相关峰。在 1555.72 nm 通道检测实验中, 设定多个故障点的反射事件, 光纤接头(FC/PC)接头松接、光

纤尾端涂脏, 检测结果如图 4(c) 所示, 在设定的各个故障点均显示一个相关峰。由图 4 中各通道检测结果可知, 探测信号经不同故障点返回来的功率强度以及与参考信号相似度均不同, 表现在相关曲线图中相关峰幅度不同。

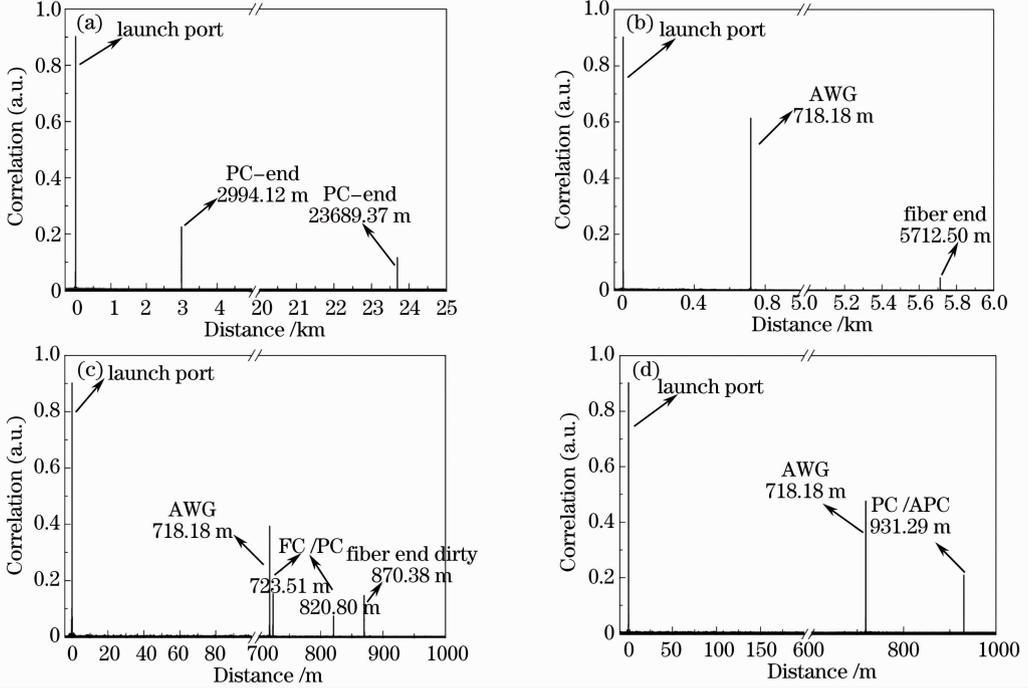


图 4 故障检测图。(a) 1551.62 nm; (b) 1553.30 nm; (c) 1555.72 nm; (d) 1557.32 nm

Fig. 4 Results of fault detection. (a) 1551.62 nm; (b) 1553.30 nm; (c) 1555.72 nm; (d) 1557.32 nm

## 5 动态范围与分辨率分析

检测装置通过参考信号和探测信号的回波信号的相关处理来实现故障点定位, 实验中用相关峰值和系统噪声的比值(PNR,  $R_{PN}$ )来测量它的动态范围。使用 1557.32 nm 波长信号, 经 EDFA 放大后功率为 12.84 mW, launch port 位置空接, 探测由 launch port 位置返回信号的相关曲线图如图 5(a) 所示, y 轴是以 dB 标度的互相关值,  $R_{PN}$  值约为

23.2 dB。为精确测量它的动态范围, 实验中在 launch port 位置后接衰减器, 模拟光在光纤中的传输损耗, 观察  $R_{PN}$  的变化。根据互相关曲线可计算  $R_{PN}$  值, 由(2)式可计算此时的功率损耗值:

$$P_{\text{loss}} = 10 \lg \frac{p_{\text{in}}}{p_{\text{out}}} \quad (2)$$

通过多次测量做拟合曲线如图 5(b) 所示, 断点检测的动态范围为 23 dB。将 23 dB 的动态范围转换成测量距离, 以损耗系数 0.2 dB/km 单模光纤为

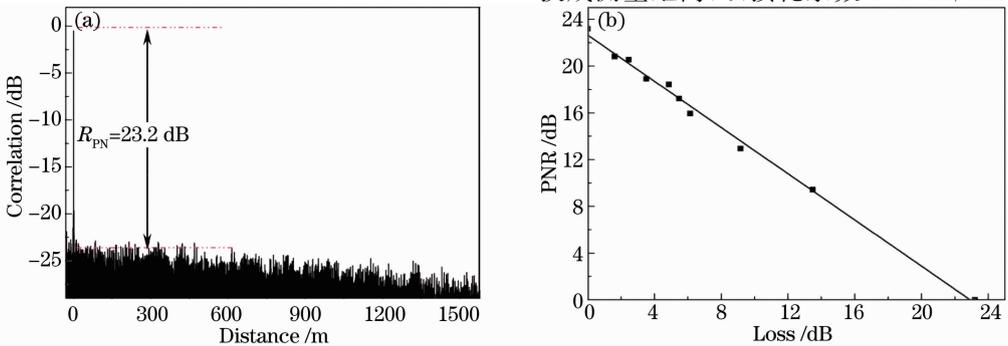


图 5 动态范围。(a) 互相关峰  $R_{PN}$ ; (b) 动态范围拟合曲线

Fig. 5 Dynamic range. (a)  $R_{PN}$  is about 23.2 dB; (b) relationship between PNR and transmission loss

例,可实现长度为 115 km 的传输光纤断点检测。实际的 WDM-PON 结构中,由于网络中 AWG 的插入损耗、光纤接头、光纤熔接、光纤弯曲等损耗的存在,动态范围有所降低。作为光纤到户的关键接入网,WDM-PON 检测主要为建筑物或小区内的小型光纤网络,该技术的动态范围完全满足 WDM-PON 的检测要求。

WDM-PON 链路故障定位技术中定位精度是

一个重要指标。基于掺铒光纤 ASE 宽带光源相关特性对 WDM-PON 故障检测的精度取决于它的空间分辨率,实验中对这种方法的空间分辨率进行了测量。实验装置如图 6 所示,在 launch port 后 100 m(光纤馈线)位置处接 50:50 的耦合器 OC-2,耦合器的一条光路连接可调光纤延迟线,另一路补偿一段光纤使两路长度相等。

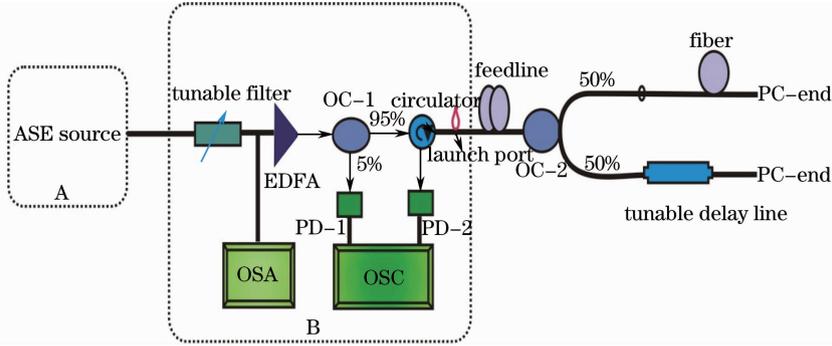


图 6 分辨率实验装置图

Fig. 6 Experiment setup of spatial resolution

调节可调延迟线的延迟时间,两路探测信号的回波信号先后经 OC-2、环形器返回 PD-2 与进入 PD-1 的参考信号做相关处理,通过示波器采集数据经电脑软件处理得到相关曲线,观察两反射相关峰能否区分开来判定它的空间分辨率。设定不同延迟时间,实验中得到如图 7 中(a)、(b)、(c)所示的三个

不同大小的分辨率图,当两路相距分别为 5.2 cm 和 4 cm 时,两相关峰能够清晰分辨出来;当两路相距 3.9 cm 时,两相关峰位置就不能够直观区分开来。综上可知实验中能够获得的最小分辨率为 4 cm。相关峰的 FWHM 决定检测的空间分辨率,实验中用 1553.30 nm 波长信号对光纤故障点检测,分析

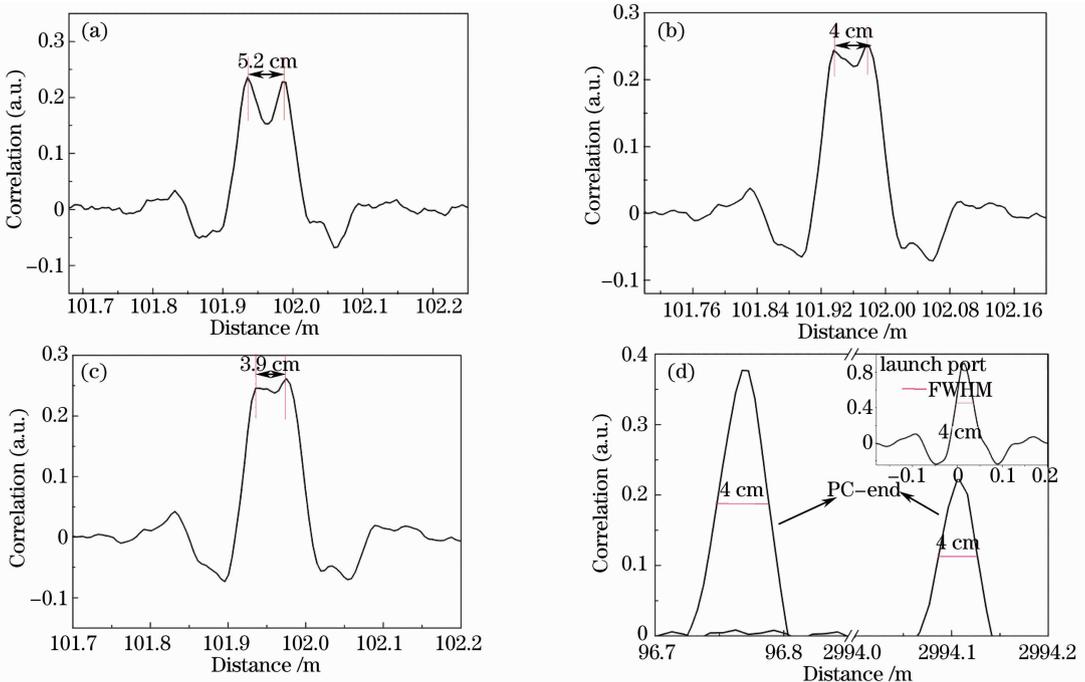


图 7 空间分辨率为(a) 5.2 cm, (b) 4 cm, (c) 3.9 cm 的相关曲线;(d) 相关峰的 FWHM

Fig. 7 Correlation curves of spatial resolution of (a) 5.2 cm, (b) 4 cm, (c) 3.9 cm; (d) FWHM of correlation peak

不同位置故障点相关峰的 FWHM。检测结果如图 7(d)所示, launch port 处与检测的两个不同位置故障点相关峰的 FWHM 均为 4 cm, FWHM 不随光在光纤中传输距离发生改变, 由此判断故障检测的空间分辨率与探测距离无关。

## 6 结 论

基于掺铒光纤宽带 ASE 光源, 对 WDM-PON 故障检测进行了实验研究。在 8 通道 WDM-PON 链路检测中, 实现多反射故障事件的测量, 实验取得 4 cm 的空间分辨率, 动态范围达 23 dB。随 WDM-PON 结构不断升级和传输容量的提高, 为满足客户高质量网络服务的需求, 网络中故障快速监测和修复变得尤为重要, 研究结果对 WDM-PON 不需做任何改动, 即可达到实现厘米量级故障检测精度以及对 WDM-PON 实时故障监测具有重要意义和实用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Frigo N J, Iannone P P, Magill P D, *et al.*. A wavelength-division multiplexed passive optical network with cost-shared components[J]. *Photon Technol Lett*, 1994, 6(11): 1365—1367.
- 2 Qi Jiang, Qiao Yaojun, Chen Shuqiang, *et al.*. A novel initial WDM upgrade scheme of a passive optical network[J]. *Chinese J Lasers*, 2001, 28(9): 854—856.  
齐江, 乔耀军, 陈树强, 等. 无源光网络的初步升级方案[J]. *中国激光*, 2001, 28(9): 854—856.
- 3 Meng Hongyun. Research of WDM-PON technology[J]. *Optical Communication Technology*, 2008, (5): 3—5.  
蒙红云. WDM-PON 技术研究[J]. *光通信技术*, 2008, (5): 3—5.
- 4 Danielson B L. Optical time-domain reflectometer specifications and performance testing[J]. *Appl Opt*, 1985, 24(15): 2313—2322.
- 5 An Yang, Feng Hao, Zhang Jingchuan, *et al.*. Phase sensitive optical time domain reflectometer based on two-beam interference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706005.  
安阳, 封皓, 张景川, 等. 基于双光束干涉的相位敏感光时域反射计[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706005.
- 6 Miao Xuefeng, Wang Tianshu, Zhou Xuefang, *et al.*. A tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0602010.  
缪雪峰, 王天枢, 周雪芳, 等. 一种可调谐的多波长布里渊掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0602010.
- 7 Thollabandi M, Kim T Y, Hann S, *et al.*. Tunable OTDR based on direct modulation of self-injection-locked RSOA for in-service monitoring of WDM-PON[J]. *Photon Technol Lett*, 2008, 20(15): 1323—1325.
- 8 Kim T Y, Chalapathi M T, Hann S, *et al.*. Tunable OTDR using self-locked RSOA for line monitoring of WDM-PON[C]. *SPIE*, 2007, 6783: 67832J.
- 9 Tanaka K, Izumita H, Tomita N, *et al.*. In-service individual line monitoring and a method for compensating for the temperature-dependent channel drift of a WDM-PON containing

- an AWGR using a 1.6  $\mu\text{m}$  tunable OTDR[C]. *IEEE Conference Publication*, 1997. 295—298.
- 10 Zhu M, Xiao S, Guo W, *et al.*. Using wavelength-tunable self-seeding Fabry-Perot laser for upstream transmission in hybrid WDM/TDM PON[C]. *SPIE*, 2010, 7989: 79890D.
- 11 Hann S, Yoo J, Park C S. Monitoring technique for a hybrid PS/WDM-PON by using a tunable OTDR and FBGs [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(5): 1070—1074.
- 12 Wang Na, Wang Anbang, Zhang Mingjiang, *et al.*. Fault location for WDM-PON by using a tunable chaotic Fabry-Perot laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(11): 1279—1285.  
王娜, 王安帮, 张明江, 等. 利用可调谐的混沌 Fabry-Perot 激光器实现波分复用无源光网络的断点检测[J]. *光子学报*, 2012, 41(11): 1279—1285.
- 13 Yang Congyuan, Wang Anbang, Zhang Zhaoxia, *et al.*. Correlation optical fiber fault locator based on chaotic laser and its experimental application research[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(2): 0208002.  
杨丛渊, 王安帮, 张朝霞, 等. 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.
- 14 Zhang Li, Wang Anbang, Li Kai, *et al.*. Fiber fault visible chaotic optical time domain reflectometry measurement method [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0308007.  
张丽, 王安帮, 李凯, 等. 光纤故障可视的混沌光时域反射测量方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0308007.
- 15 Rodes R, Jensen J B, Zibar D, *et al.*. All-VCSEL based digital coherent detection link for multi Gbit/s WDM passive optical networks[J]. *Opt Express*, 2010, 18(24): 24969—24974.
- 16 Zhao T, Wang A, Wang Y, *et al.*. Fiber fault location utilizing traffic signal in optical network[J]. *Opt Express*, 2013, 21(20): 23978—23984.
- 17 Cao Ying, Gu Zhengtian. Optical properties of cascaded long-period and fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0405003.  
曹莹, 顾铮先. 级联长周期光纤光栅和 Bragg 光纤光栅的光学特性[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0405003.
- 18 Yeh C H, Chi S. Optical fiber-fault surveillance for passive optical networks in S-band operation window[J]. *Opt Express*, 2005, 13(14): 5494—5498.
- 19 Naim N F, Ab-Rahman M S, Kamaruddin N H, *et al.*. Real-time monitoring and fault locating using amplified spontaneous emission noise reflection for tree-structured Ethernet passive optical networks[J]. *Opt Eng*, 2013, 52(9): 096112.
- 20 Liu Yinggang, Jia Zhen'an, Qiao Xueguang, *et al.*. Improving the output spectral flatness of fiber ASE source with three-stage double-pump configuration [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(11): 2061—2065.  
刘颖刚, 贾振安, 乔学光, 等. 三级双泵结构光纤 ASE 光源输出光谱平坦度的改善[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(11): 2061—2065.
- 21 Zhang Li, Liu Chengxiang, Ruan Shuangchen, *et al.*. High-power, high efficiency erbium-doped superfluorescent fiber source[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060604.  
张力, 刘承香, 阮双琛, 等. 高功率高效率掺铒光纤超荧光光源[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060604.
- 22 Wang Xiulin, Ming Hai, Wang Anting, *et al.*. C + L-band erbium-doped fiber broadband light source using one-stage configuration[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(2): 166—170.  
王秀琳, 明海, 王安廷, 等. 单级结构 C+L 波段掺铒光纤宽带光源[J]. *中国激光*, 2006, 33(2): 166—170.

栏目编辑: 王晓瑛