

doi: 10.3788/gzxb20124111.1279

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

王娜¹, 王安帮^{1,2}, 张明江^{1,2}, 徐航¹, 杨玲珍¹, 王云才^{1,2}

(1 太原理工大学 光电工程研究所, 太原 030024)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

摘 要:波分复用无源光网络具有支路多、节点密的特征,为精确定位各支路的断点,提出了一种基于可调谐混沌 Fabry-Perot 激光器的检测方法.将光反馈多纵模 Fabry-Perot 半导体激光器作为混沌光源,在改变反馈光波模式的条件下输出波长可调谐的混沌激光.以探测光的波长标记各被测支路,将探测信号和携带延时信息的回波信号进行互相关运算,根据相关曲线峰值的位置即可完成定位.分析了可调谐混沌源的特性,并以 1×4 的波分复用无源光网络为例,进行了初步的实验验证,结果表明该方法可以精确定位光网络支路中连接点及断点的位置,空间分辨率达 4 cm,且与探测距离无关.

关键词:混沌; 光网络断点检测; Fabry-Perot 激光器; 光时域反射仪

中图分类号: TN929.11; TN929.18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2012)11-1279-7

0 引言

波分复用无源光网络(Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Networks, WDM-PON)在光网络终端与各光网络单元之间构建了点到多点的拓扑结构,具有覆盖面积广、通信容量大等一系列的优点,在光纤通信领域尤其是光纤到户领域有着广泛的应用^[1-2].因此分辨 WDM-PON 中的故障支路,并精确定位故障点的位置,对保障光纤网络通信的顺利进行具有重要的意义.

光时域反射仪(Optical Time Domain Reflectometry, OTDR)以发射和接收光脉冲的时间间隔确定测量距离,是目前进行光纤断点检测的主要工具^[3].结合 WDM-PON 的点到多点的基本结构特点,传统的 OTDR 由于其不可调谐性,只能逐一的检测各个通信支路,已不能满足网络检测的需求.为解决这一问题, Kuniaki 等人^[4-6]提出了波长可调谐的脉冲 OTDR,以光脉冲作为探测信号.但由于脉冲宽度的存在,脉冲 OTDR 的空间分辨率和测量距离存在原理上的矛盾,要提高测量的空间分辨率,需要缩短脉冲宽度,进而导致系统的测量距离减小,在现有调制技术的基础上,空间分辨率多达数十米.

为解决上述矛盾问题,2009 年 Woojin Shin 课

题组^[7]提出了波长可调谐的随机码 OTDR,以光随机码序列作为探测信号.原理上可以通过增加码长增大测量距离,且不影响空间分辨率,但在实际应用中,光随机码序列的产生需要电随机码调制激光器,受电子带宽瓶颈的限制,OTDR 的空间分辨率很难进一步提高.随着光纤到户的发展,网络越来越小型化,节点多且密集,迫切需要一种高分辨率的检测方法.

半导体激光器在光反馈和光注入的条件下可以产生随机起伏的混沌信号,混沌信号的带宽达到数 GHz^[8-10],并且有很好的相关性,可作为理想的雷达和测距信号.文献^[11-12]以混沌激光作为探测信号的混沌 OTDR 不仅解决了测量距离和空间分辨率之间的矛盾问题,而且不需要昂贵的随机码发生器,成本低廉,目前已将其扩展到电缆故障检测的领域^[13-14].

本文针对 WDM-PON 检测中亟需解决的支路多、节点密等问题,在上述工作基础上进一步提出了波长可调谐的混沌 OTDR.以光反馈多纵模的 FP 激光器作为混沌光源,在改变反馈光波模式的条件下输出波长可调谐的混沌激光.以可调谐混沌信号代替传统的脉冲信号作为探测光,实现多路检测的同时可以精确定位故障点的位置.文中对波长选

基金项目:国家自然科学基金(No. 61107033)、国家自然科学基金青年科学基金(No. 60908014)、山西省青年科学基金(No. 2009021003)和瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金(No. SKLST201015)资助

第一作者:王娜(1986—),女,硕士研究生,主要研究方向为光网络的故障检测. Email: wangnazai2000@163.com

通讯作者:王安帮(1982—),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为半导体激光器非线性动力学特性及其应用. Email: wanganbang@tyut.edu.cn

责任作者/导师:王云才(1965—),男,教授,博导,主要研究方向为半导体激光器非线性动力学特性及其应用. Email: wangyc@tyut.edu.cn

收稿日期: 2012-07-09; **修回日期:** 2012-09-08

择过程中的混沌源进行了特性分析,并利用该混沌信号对 4 条 WDM-PON 支路上的连接点和断点进行了定位,同时对空间分辨率等主要参量进行了测试.

1 实验装置

可调谐的混沌激光相关法 OTDR 实验装置如图 1 所示.系统主要分两个部分:波长可调谐的混沌光源以及断点定位部分.光反馈 FP 半导体激光器作为混沌光源,纵模间隔为 1.2 nm,纵模数量约为 30.实验过程中,通过调节激光器的温度控制器,将其各模式的中心波长与通道间隔为 50 GHz 的密集波分复用网络的通信波长相对应;两个光环形器(Optical Circulator, OC)构成反馈腔,反馈光的强度和偏振态分别由环路中的可调光衰减器(Variable Optical Attenuator, VOA)和偏振控制器(Polarization Controller, PC)调节和控制.微调布喇格光纤光栅(Tunable Fiber Bragg Grating, TFBG),选定某一光波模式反馈回激光器,得到单一模式的混沌输出,改变反馈光的光波模式,即可得到可调谐的混沌信号.探测过程中,混沌激光经耦合器分为两路,一路(90%)作为探测光环形器后由阵列波导光栅(Arrayed Waveguide Grating, AWG)进入待检测支路,另一路(10%)经 50 : 50 的耦合器后再分为两路,一路输入光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)观察输出的混沌光谱,对照 AWG 各信道的中心波长,确定此时的检测支路,并由频谱分析仪采集混沌频谱;另一路作为参考光和探测光的回波信号经两个相同性能参量的

带宽为 1 GHz 的光电探测器(Photoelectric Detector, PD)进行光电转换,并由实时示波器(Oscilloscope, OSC)进行采集,计算机对参考信号和携带延时信息的回波信号做互相关运算,确定断点的具体位置.

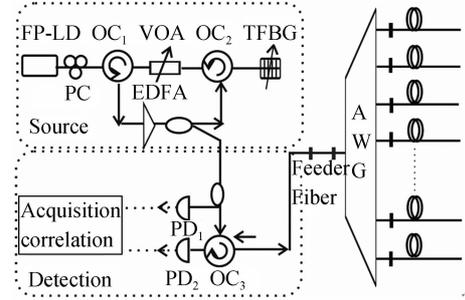


图 1 实验装置
Fig. 1 Experimental setup

2 波长可调谐的混沌光特性

实验中设置 FP 激光器的偏置电流为 24.6 mA,约为阈值电流的两倍,激光器的输出光功率为 3 dBm,工作波长的范围为 1 530~1 570 nm,TFBG 的波长调谐范围为 1 530~1 570 nm, -3 dB 线宽为 0.5 nm,小于 AWG 的 0.7 nm 线宽. OSA 的扫描波长范围为 600~1 700 nm,最小分辨率为 0.06 nm, PD₁、PD₂ 的带宽均为 1 GHz, OSC 的带宽 6 GHz,最大的实时采样率为 40GSample/s.

从 30 个波长的混沌信号中,任意选取波长为 1 548.51 nm、1 549.72 nm、1 550.92 nm、1 552.12 nm 的混沌激光为例,进行特性分析.其中模式选择前后的光谱图如图 2 所示,各光谱的边模抑制比(Side Mode Suppression Ratio, SMSR)在 24 dB 左右.

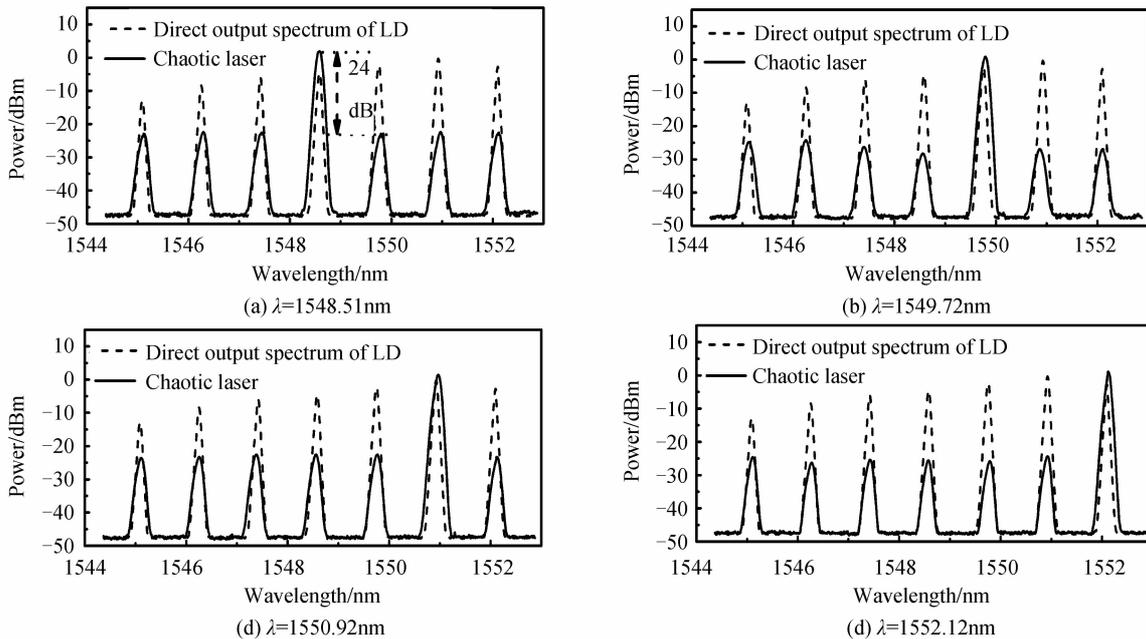


图 2 可调谐混沌激光的光谱图
Fig. 2 Optical spectrum of the chaotic laser

图 3 依次给出了四路混沌信号的时序、频谱、自相关曲线图. 混沌信号在时序上呈现快速不规则的类噪声特性; 频谱带宽可以延伸至 8 GHz; 自相关曲

线呈 δ 函数形式, 细且尖锐, 且这一特点并未随波长模式的转变而发生变化. 得益于其频谱宽和相关性好的特点, 混沌信号可以作为理想的测距信号.

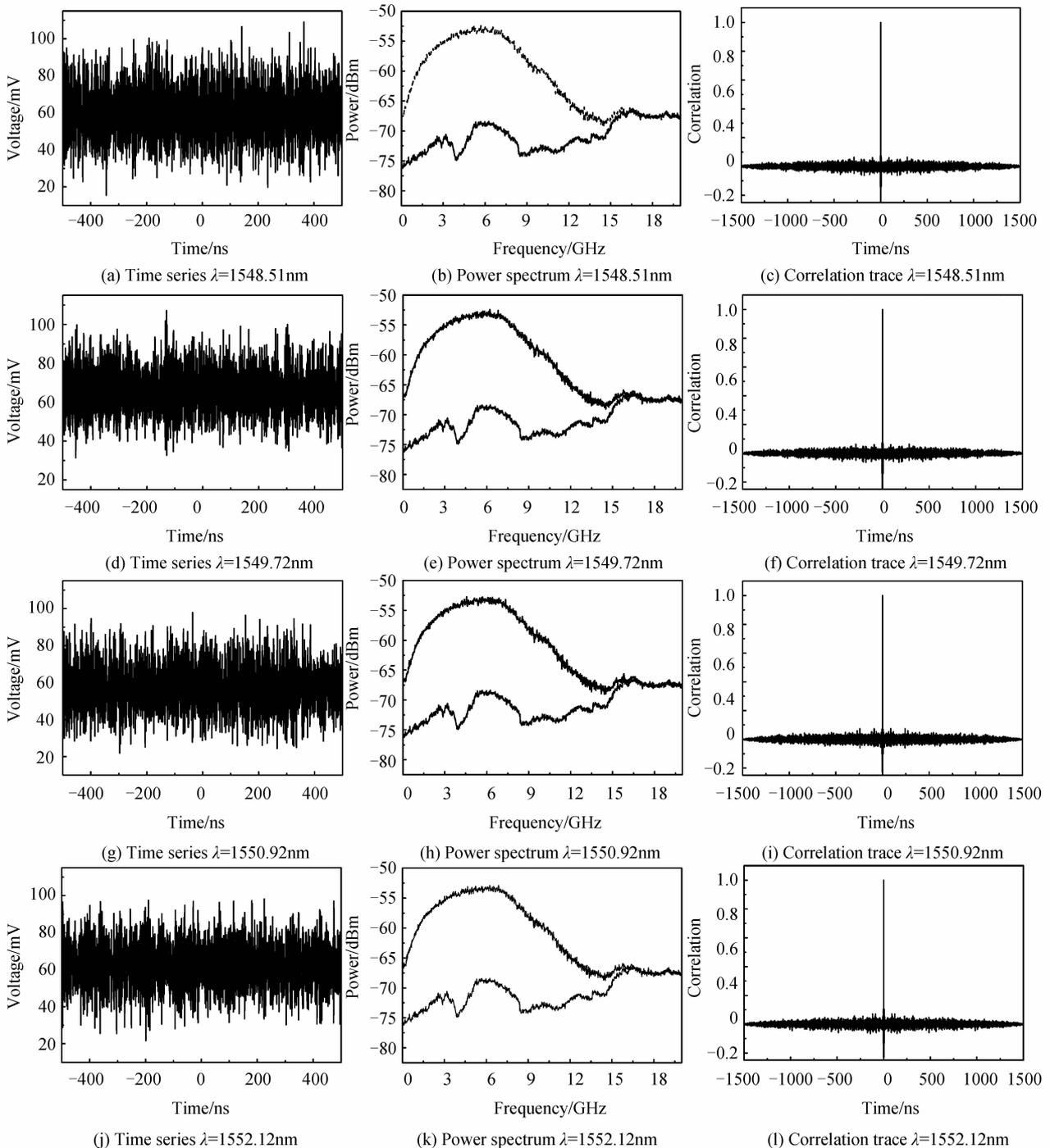


图 3 波长可调谐混沌激光的特性曲线

Fig. 3 Characteristic traces of tunable chaotic laser

调谐 TFBG 过程中, 输出光要保持良好的混沌状态, 进而得到自相关曲线噪声底低和频谱宽的混沌信号, 并且输出光的 SMSR 要尽量高, 保证单一模式的激光输出. 因此讨论了反馈强度和波长失谐 (TFBG 与待锁定模式的中心波长差) 两个主要参量对混沌源特性的影响. 混沌状态用最大李雅普诺夫指数 (Largest Lyapunov Exponent, LLE) 表征,

混沌状态对应的 LLE 为正值^[15-16]. 图 4(a)、(b) 所示为波长失谐量在 ± 0.1 nm (由 AWG 允许的波长误差决定) 范围内变化时, SMSR 和 LLE 的变化曲线; SMSR 保持在 20 dB 以上, 0 失谐时达到最大 24~25 dB; LLE 在整个变化范围内都为正值, 0 失谐时达到最大值, 此时的反馈强度保持在 20%, 且上述变化趋势并未受到输出模式转变的影响. 图 4

(c)、(d)所示为反馈强度在 0 和 0.1 失谐情况下对 SMSR 和 LLE 的影响曲线. 随着反馈光强的增大, SMSR 也逐渐增大, 最后达到注入锁定状态, 波长失谐量为 0 时, 激光器较早进入注入锁定状态; 激光器在 5~40% 的反馈状态下, 输出状态均为混沌, 考虑

到调谐过程中有一定的波长失谐误差, 依据图 4(d)所示, 反馈强度固定在 20~25% 的调节范围内, 保证进行模式选择时, 失谐误差对混沌态的影响降低到最小.

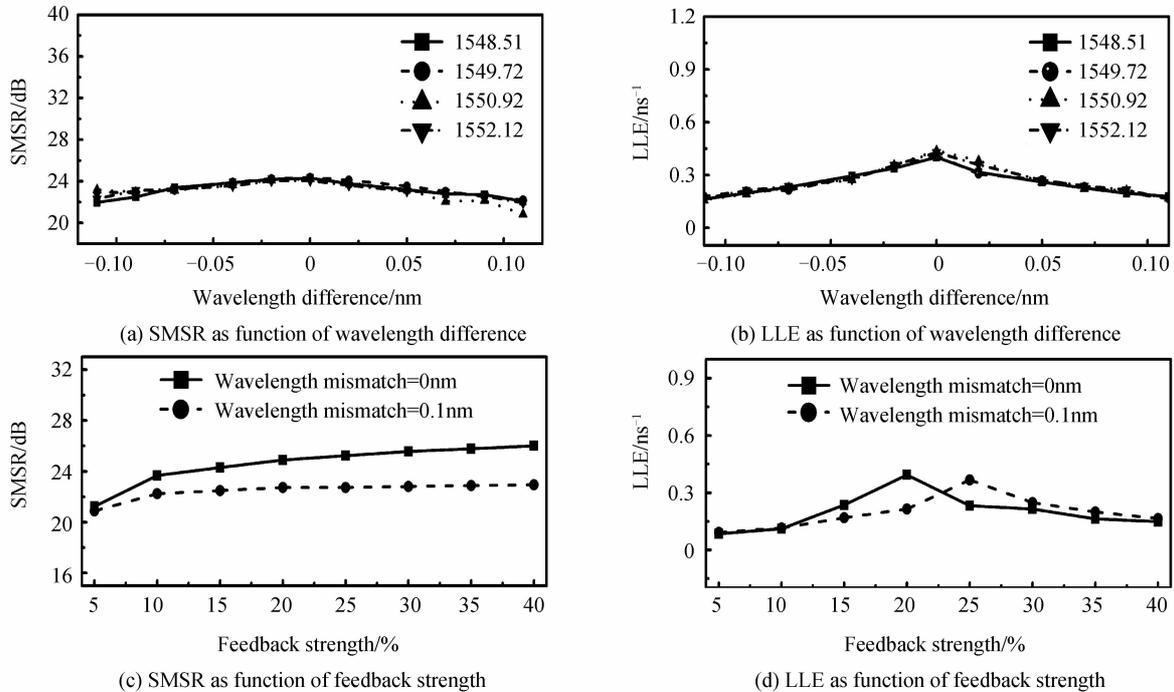


图 4 SMSR 和 LLE 与波长失谐量和反馈强度的关系曲线

Fig. 4 SMSR and LLE as functions of the wavelength mismatch and the feedback strength

3 实验结果与分析

3.1 检测实例

由于混沌信号的自相关曲线具有类似于 δ 函数的线形, 且混沌激光输出光功率的时间序列与其延迟序列的互相关函数也具有如此的性质, 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. 设参考信号满足的函数关系式为 $X(t)$, 携带延时信息的回波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, τ 为探测信号相对与参考信号在光纤中多传输的时间, 两信号的互相关函数表达式为

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

相关曲线中 τ 时刻位置有对应的相关峰, 即可确定待测的目标距离为 $c \cdot \tau / 2n$, 其中 c 为光速, n 为传输介质的折射率, 由此实现寻峰定位.

实验中的 WDM-PON 基本结构如下: 约 20 km 的光纤馈线经 AWG 与不同长度的光纤支路相连. 光纤的损耗系数约为 0.2 dB/km, 混沌激光由环形器输出后 (该位置校正为系统的 0 坐标位置), 传输约 20 km 的光纤馈线后由 AWG 的相应通道进入被

测的光纤支路, 其中 AWG 通过 LC/PC-FC/PC 的转换跳线分别于网络支路和馈线相连, AWG 的插入损耗为 4 dB, 通道间隔为 50 GHz. 检测过程中调节 TFBG 改变探测光的波长, 依据 OSA 显示的波长, 确定被检测支路. 检测结果如图 5 所示. 图 5(a) 中, AWG 处的反射峰以及其后几百米的光纤支路末端均清晰可见; 对 AWG 对应的反射峰进行放大, 即图 5(b), AWG 前后的 LC/PC 和 FC/PC 连接头, 这种近距离的故障点仍可以被准确分辨; 改变探测波长, 如图 5(c) 所示, 经 AWG 后测到 23 664.26 m 处的 FC/PC 连接头与 33 091.71 m 处的 PC 末端; 若断点出现在馈线某位置处, 则馈线后的网络支路因探测光无法到达, 不再有相关峰, 如图 5(d) 所示.

混沌相关法测距, 相关峰的高度不仅取决于反射光强, 而且与两个信号经 τ 时间延时后的相关长度有关系, 因此由于各故障点处的反射光强不同, 经不同延时后的相关长度不同, 相关曲线中的峰值高低不一. 目前, 图 5 中的相关曲线只能精确定位断点和连接点的位置, 尚无法表征瑞利散射的变化趋势, 目前该项工作仍在进行中.

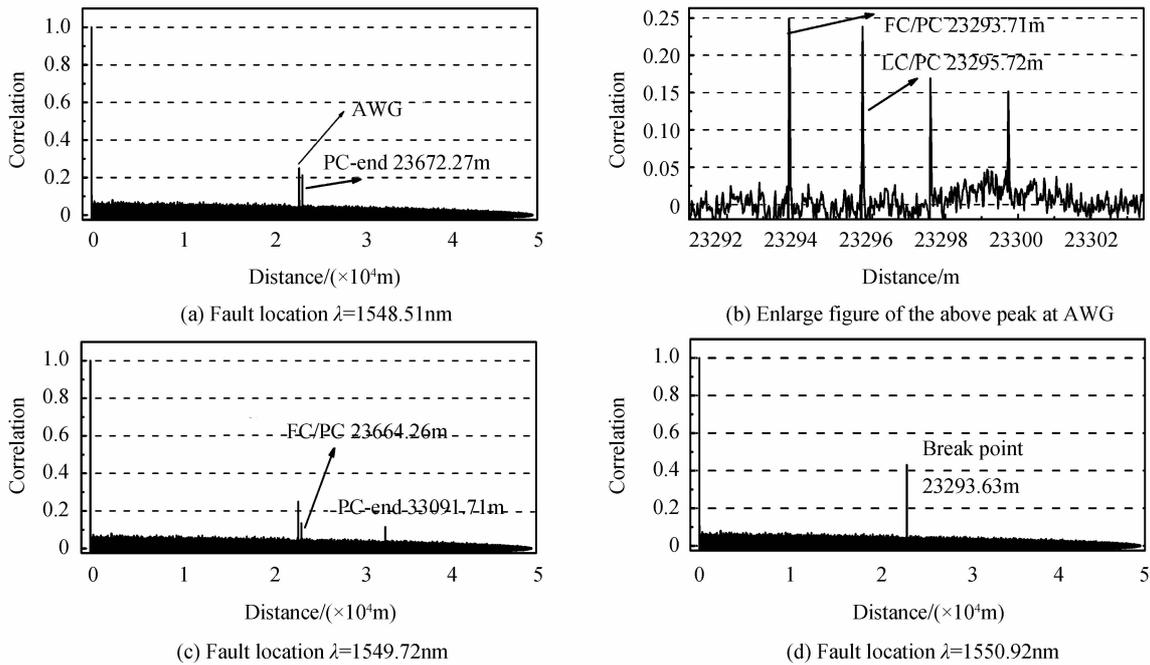


图 5 波长可调谐的混沌相关法 OTDR 进行 WDM-PON 断点检测的实验结果

Fig. 5 Experimental results of the fault location for WDM-PON utilizing the tunable chaos correlation OTDR

3.2 空间分辨率

混沌信号测距的空间分辨率由相关曲线的半高全宽 (Full-Width at Half Maximum, FWHM) 决定, 在满足奈奎斯特采样定律的正确采样条件下, 对应的空间分辨率为 $\nu \cdot \text{FWHM} / 2$. 此混沌信号的带宽可达 8 GHz, 实际的测量过程中, 往往受到信号采集带宽的限制. 采集带宽为 500 MHz 时, FWHM 约为 0.6 ns; 采集带宽提升到 1 GHz 时, FWHM 约为 0.4 ns; 继续增大到 3 GHz, FWHM 约为 0.13 ns, 对应的空间分辨率约为 1.3 cm. 采集带宽约接近混沌信号本身的带宽, FWHM 的变化越小, 宽谱的混沌信号可以实现 $< 1 \text{ cm}$ 的检测. 上述关系曲线由图 6(a) 给出, 同时 3 G、1 G、500 M 采集带宽下混沌信号自相关峰的 FWHM 如图 6(b) 所示.

实验中 PD₁ 和 PD₂ 的带宽为 1 GHz, 按照图 6 所述的关系, 利用该混沌信号可以实现 4 cm 空间分辨率的检测, 并且这一结果在实验中得到了论证. 混沌激光经 50 : 50 的耦合器后, 一端连接光纤跳线, 一端连光延时线, 利用光延时线调至两者光程差为 4 cm, 分辨结果如图 7(a) 所示. 混沌信号测距的空间分辨率与检测距离并无关系, 并不会随检测距离的增大而减小. 实验中对某一支路的检测结果进行了对比分析, 图 7(b) 插图所示, 位于馈线 19 km 处 FC/PC 连接器的反射峰 a 以及支路中 48 km 处 PC 末端的反射峰 b 对比与混沌信号的自相关曲线, 可见三者的 FWHM 相同, 均为 0.4 ns, 并未随着传输

距离的增大而展宽. 以上结果表明该方法可以实现 cm 量级的高准确度检测, 且测量空间分辨率并不会随探测距离的增加而降低.

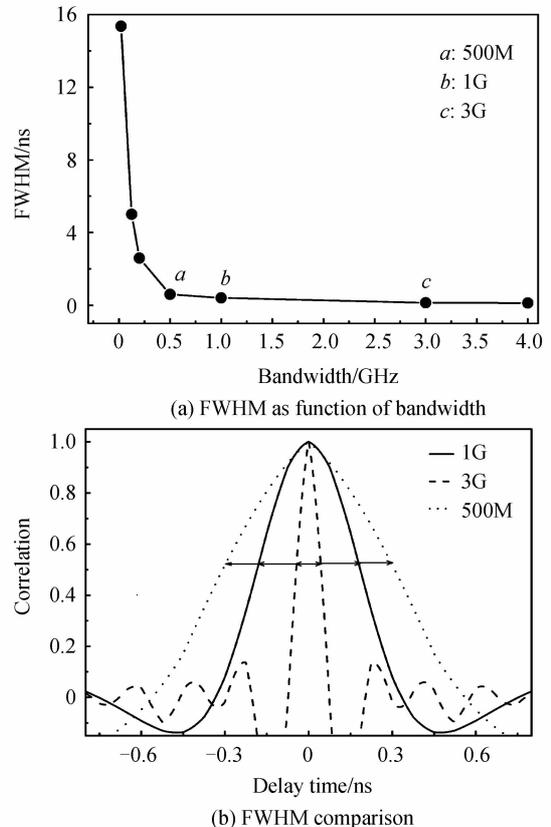


图 6 半高全宽与带宽的关系曲线

Fig. 6 Relationship between FWHM and bandwidth

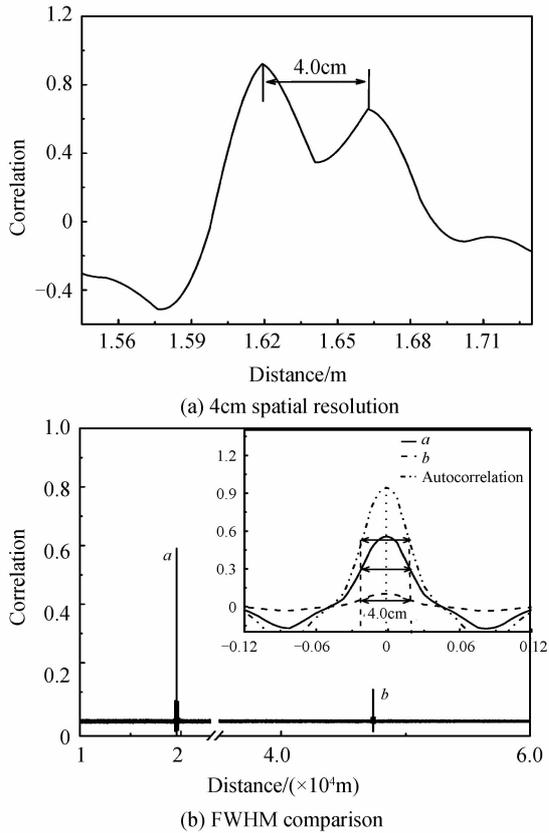


图 7 4 cm 空间分辨率
Fig. 7 4 cm spatial resolution

4 讨论

在该探测系统中,FP-LD 有 30 个纵模,模式选择后,边模抑制比可达 24 dB,即边模并未完全消失.由于边模之间相关性的存在,必将对检测结果造成一定的影响.而边模对探测结果影响最大的情况为所有边模携带同一时刻的延时信息和参考信号做相关.为了探讨这一干扰程度进行了下面的模拟实验:模式 1 代表主要的探测模式,模式 2 代表 30 个边模的总强度,耦合后一路作为参考光,一路作为探测光经 AWG 进入两路不同的光纤支路中.两条支路中的被测点相差几百米,末端均为 FC/PC 连接头有近似的反射率,可以忽略衰减对边模抑制比造成的影响.调节模式 2 的光强,得到在不同抑制比条件下的探测结果如图 8 所示:(a)为抑制比为 22 dB 时的检测结果,在相关曲线中只能体现支路 1 中的断点信息;(b)为抑制比为 5 dB 时,在以支路 1 为被测对象的相关曲线中,体现出了支路 2 的断点信息,已对检测结果造成了影响,对应图(c)中 a、b 两点;当干扰峰与基底高度相当时,认为此时模式 2 并未对主模式 1 的检测造成干扰. 30 个模式若携带同一时刻的延时信息返回,等效为抑制比减小 14.7 dB,为

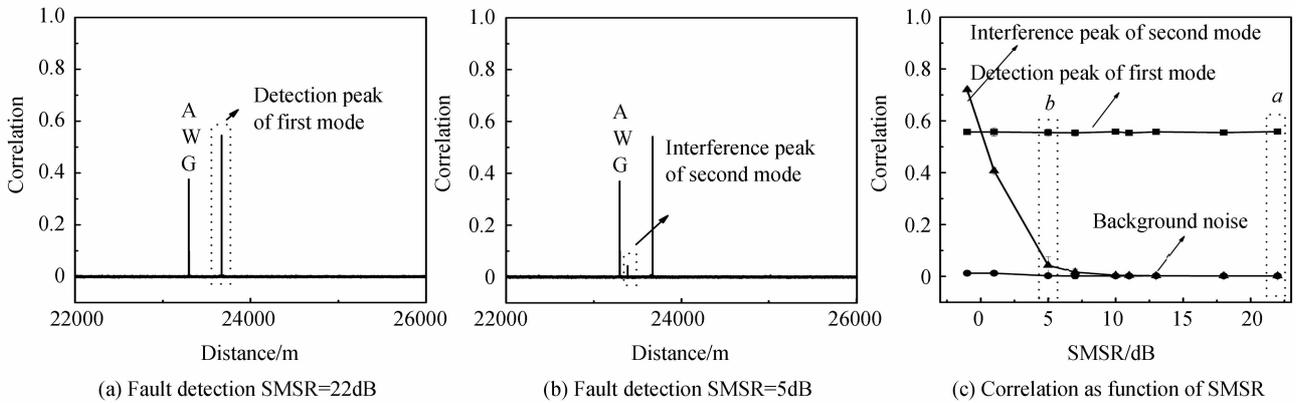


图 8 边模抑制比对探测结果的影响曲线
Fig. 8 The curve of SRSR impact on the fault detection

9.3 dB,对照图 8(c)中的变化曲线,此时干扰峰仍没入在噪音基底中,不会对检测结果带来影响.尚且不考虑这一事件发生的微小概率,提高 TFBG 的滤波性能即可避免这一干扰结果.

5 结论

本文针对 WDM-PON 中支路多、节点密集等特征,提出基于可调谐混沌信号的高准确度检测方法.该方法以多纵模的 FP 激光器为光源,改变反馈光的光波模式,输出波长可调谐的混沌信号,利用探测光的波长区分各个探测支路,然后通过相关法定位支路中反射事件.实验中以 4 条通道间隔为 50 GHz

的 DWDM-PON 支路为例进行了实验论证,实验结果表明该方法可以精确定位连接头和断点的位置,空间分辨率可达厘米量级,且与探测距离无关.随着光纤到户的发展,该技术必将在小型化密集分布的 WDM-PON 检测中具有广泛的应用前景.

参考文献

[1] PARK S J, LEE C H, JEONG K T, et al. Fiber-to-the-home services based on wavelength-division-multiplexing passive optical networks [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(11): 2582 - 2591.
 [2] LEE C H, KIM B Y. Fiber to the home using a PON infrastructure[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4568-4583.
 [3] MOHAMMAD M R, KERIM F, HABIB A F, et al. Passive

- optical network monitoring: challenges and requirements[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2011, **49**(2): 45-52.
- [4] TANAKA K, TATEDA M. Measuring the individual attenuation distribution of passive branched optical networks [J]. *Photonics Technology Letters*, 1995, **8**(7): 915-917.
- [5] PARK J, BAIK J, LEE C. Fault-detection technique in a WDM-PON[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(4): 1461-1466.
- [6] THOLBANDI M, KIM T Y, HANN S. Tunable OTDR based on direct modulation of self-injection-locked RSOA for in-service monitoring of WDM-PON [J]. *Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(15): 1323-1325.
- [7] SHIN W, YU B A, LEE Y L, *et al.* Wavelength tunable optical time-domain reflectometry based on wavelength swept fiber laser employing two-dimensional digital micro-mirror array [J]. *Optics Communication*, 2009, **282**(6): 1191-1195.
- [8] DING Ling, WU Jia-gui, XIA Guang-qiong, *et al.* Effect of external optical feedback strength on time delay signatures in semiconductor laser with double optical feedback [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **4**(5): 740-745.
丁灵, 吴加贵, 夏光琼, 等. 双光反馈半导体激光混沌系统的外腔反馈强度对延时特征的影响 [J]. *光子学报*, 2011, **4**(5): 740-745.
- [9] ZHANG Xiu-juan, WANG Bing-jie, YANG Ling-zhen, *et al.* Flat broadband chaotic carrier generation and synchronization [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(5): 3203-3207.
张秀娟, 王冰洁, 杨玲珍, 等. 平坦宽带混沌激光的产生及同步 [J]. *物理学报*, 2009, **58**(5): 3203-3207.
- [10] WANG A B, WANG Y C, HE H C. Enhancing the bandwidth of the optical chaotic signal generated by a semiconductor laser with optical feedback [J]. *Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(19): 1633-1635.
- [11] WANG An-bang, WANG Yun-cai. Chaos correlation optical time domain reflectometry [J]. *Science China Information Sciences*, 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.
- [12] YANG Cong-yuan, WANG An-bang, ZHANG Zhao-xia, *et al.* Correlation optical fiber fault locator based on chaotic laser and its experimental application research [J]. *Chinese Journal Lasers*, 2011, **38**(2): 0208002-1-0208002-5.
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): 0208002-1-0208002-5.
- [13] XU Hang, WANG An-bang, HAN Xiao-hong, *et al.* Measuring breakpoints and impedance mismatch for dielectric transmission lines by using correlation method of chaotic signals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(9): 090503-1-090503-6.
徐航, 王安帮, 韩晓红, 等. 混沌信号相关法测量电介质传输线的断点及阻抗失配 [J]. *物理学报*, 2011, **60**(9): 090503-1-090503-6.
- [14] HAN Guo-hua, WANG Yun-cai. Faults location for transmission lines by using chaotic laser signal [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(2): 0208002-1-0208002-5.
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*, 2011, **38**(2): 0208002-1-0208002-5.
- [15] BEHNIA S, MABHOUTI K, JAFARI A, *et al.* Observations on the dynamics of external cavity semiconductor lasers [J]. *Optik*, 2012, **123**(17): 1555-1561.
- [16] WANG Yan-bin, ZHANG Sheng-hai, SHAO Ming, *et al.* Chaos and chaotic synchronization in current-modulated semiconductor lasers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2167-2171.
王彦斌, 张胜海, 邵铭, 等. 电流调制半导体激光器的混沌及其同步 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(11): 2167-2171.

Fault Location for WDM-PON by Using a Tunable Chaotic Fabry-Perot Laser

WANG Na¹, WANG An-bang^{1,2}, ZHANG Ming-jiang^{1,2}, XU Hang¹,
YANG Ling-zhen¹, WANG Yun-cai^{1,2}

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

(2 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: The main characteristic of WDM-PON is the node-tree structure. In order to precisely locate faults in each branch, a method based on tunable chaotic Fabry-Perot laser is proposed. Chaotic light emitted from a optical feedback multiple-longitudinal mode Fabry-Perot semiconductor laser diode is utilized as the probe beam. By selecting the feedback mode, a tunable chaotic laser is obtained. The branches of the optical networks are distinguished by the laser's wavelength, and fault location is realized by calculating the cross-correlation of transmitted and back-reflected signals. In the experiment, we analyse the chaotic property and take a 1×4 ITU WDM-PON to be detected, the measurement results show that the breakpoints and connectors could be precisely located, an rang-independent spatial resolution within 4 cm are achieved with this method.

Key words: Chaos; Fault location for optical networks; Fabry-Perot laser diode; OTDR