

# 基于光纤环的混沌光时域反射仪动态范围增大

胡志宏<sup>1,2</sup>, 赵彤<sup>1,2\*</sup>, 贺培鑫<sup>1,2</sup>, 王冰洁<sup>1,2</sup>, 王安帮<sup>1,2</sup>, 王云才<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

<sup>2</sup>太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;

<sup>3</sup>广东工业大学信息工程学院, 广东 广州 510006

**摘要** 外腔反馈半导体激光器产生的混沌具有明显的弛豫振荡特征, 低频段能量过低, 限制了混沌光时域反射仪 (OTDR) 的动态范围。提出了一种光纤环结构, 用以增大混沌 OTDR 的动态范围。通过实验和数值模拟, 发现混沌光经过光纤环时会发生多光束干涉, 并通过延迟自拍频效应提高了混沌信号低频段能量。实验测量结果表明: 在 200 MHz 探测带宽下, 基于光纤环的混沌 OTDR 动态范围增大了 5 dB。

**关键词** 测量; 混沌光时域反射仪; 光纤环; 动态范围; 多光束干涉

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1004006

## Improving Dynamic Range of Chaos Optical Time Domain Reflectometry Using Fiber Ring

Hu Zhihong<sup>1,2</sup>, Zhao Tong<sup>1,2\*</sup>, He Peixin<sup>1,2</sup>, Wang Bingjie<sup>1,2</sup>,  
Wang Anbang<sup>1,2</sup>, Wang Yuncai<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

<sup>2</sup>College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

<sup>3</sup>School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China

**Abstract** The chaos generated by the external-cavity feedback semiconductor laser has an obvious relaxation oscillation and the energy of the low-frequency band is low, limiting the dynamic range of chaos optical time domain reflectometry (OTDR). An optical fiber ring structure is proposed herein to improve the dynamic range of the chaos OTDR. Experiments and numerical simulation find that multibeam interference occurs when the chaotic light passes through the fiber ring. Moreover, the energy of the low-frequency band is improved by delaying the self-beat frequency effect. The experimental detection results show that the dynamic range of the chaos OTDR increases by 5 dB when the fiber ring is used under a 200-MHz detection bandwidth.

**Key words** measurement; chaos optical time domain reflectometry; fiber ring; dynamic range; multibeam interference

**OCIS codes** 120.4825; 140.1540

## 1 引言

光时域反射仪 (OTDR) 是一种检测光纤网络故障的重要工具<sup>[1-2]</sup>。近几年, 随着光纤到户等工程的快速发展, 光纤网络存在多路分支、用户之间连接距离短的问题<sup>[3]</sup>, 迫切需求大动态范围<sup>[4-5]</sup>、高空间分

辨率的 OTDR<sup>[6]</sup>。

传统脉冲飞行法 OTDR 通过发射光脉冲分析回波脉冲到达时间与功率, 实现光纤故障定位。这种测量方法虽然简单, 但在原理上存在弊端: 动态范围与空间分辨率是一对无法调和的参数。增大动态范围, 就必须牺牲空间分辨率。一般脉冲飞行法

收稿日期: 2019-04-30; 修回日期: 2019-05-30; 录用日期: 2019-06-01

基金项目: 国家自然科学基金 (618222509, 61731014, 61671316, 61705160, 61805170, 61805171, 61475111)

\* E-mail: zhaotong.tyut@outlook.com

OTDR的空间分辨率被限制在几米内。为了克服这个矛盾,研究者们提出了诸多改良技术<sup>[7-12]</sup>。其中伪随机码相关法 OTDR<sup>[9-10]</sup>就是一种有用的技术。其基本原理如下:将利用伪随机码调制的脉冲序列作为探测信号,将光纤故障点反射回来的脉冲序列与原始脉冲序列进行互相关运算,从而实现光纤故障定位。虽然伪随机码相关法 OTDR 可以很好地解决空间分辨率与动态范围的矛盾,但是伪随机码有限的码长也限制了动态范围的进一步提升。此外,受限于伪随机码发生器的电子瓶颈,随机码码元宽度有限,导致其空间分辨率难以满足现有光纤故障检测需求。2008年,Wang等<sup>[13]</sup>提出了基于相关法的混沌 OTDR。与伪随机码相关法 OTDR 的不同之处在于:混沌 OTDR 利用宽带的混沌光源代替伪随机码调制的光源。因此,混沌 OTDR 不仅能够克服空间分辨率与动态范围的矛盾,还具有高空间分辨率优势,可实现与距离无关的厘米量级光纤故障定位<sup>[14-19]</sup>。

现有混沌 OTDR 中的混沌源一般采用结构简单的外腔反馈半导体激光器<sup>[20-21]</sup>,这样更有利于混沌光源的集成<sup>[22]</sup>以及产业化生产<sup>[23]</sup>。然而,外腔反馈半导体激光器产生的混沌信号具有明显的弛豫振荡特征,低频段能量过低。在实际应用中,考虑到混沌 OTDR 成本等问题,探测器等电子器件带宽一般远小于弛豫振荡频率,导致混沌信号能量利用率不足,限制了混沌 OTDR 的动态范围。此外,探测器等电子器件都是从直流成分开始响应,提高混沌信号低频段能量显然有利于提高接收到的信号能量,进而改善混沌 OTDR 的动态范围。提高混沌信号低频段能量对于混沌的其他实际应用也具有重要意义<sup>[24-25]</sup>。

在之前的工作中<sup>[26]</sup>,本课题组已经研究了由光纤耦合器、光纤放大器、滤波器构成的光纤环形谐振腔用以增大外腔反馈半导体激光器产生的混沌信号带宽。本文将光纤环形谐振腔中的光纤放大器、滤波器去掉,仅用光纤耦合器构成简易的光纤环(FR)。通过在混沌光源处引入光纤环,实现了对混沌频谱的整形,从而使得低频段能量大幅度提升。以 200 MHz 带宽为例,基于光纤环的混沌 OTDR 动态范围相较于无光纤环的混沌 OTDR 增大了 5 dB。理论分析和数值模拟表明:混沌光通过光纤环后产生的延迟自拍频效应是低频段能量提高的主要原因。需要说明的是,混沌 OTDR 的空间分辨率只与带宽有关,本文方法对其空间分辨率无影响,

200 MHz下获得的空间分辨率为 22 cm<sup>[14]</sup>。

## 2 实验装置及结果

### 2.1 实验装置

图 1 所示是基于光纤环的混沌 OTDR 实验装置。分布式反馈半导体激光器(DFB, EP1550-0-DM-B05-FM, Eblana photonics, 爱尔兰)的输出光分为两路:一路形成外腔反馈;另一路作为混沌光输出。外腔反馈结构由偏振控制器(PC)、50:50 光纤耦合器(FC<sub>1</sub>)、可调光衰减器(VOA)以及光纤反射镜(FM)构成。反馈光的强度和偏振状态分别通过 VOA、PC 调节。产生的混沌光经隔离器(OI)到达光纤环,经掺铒光纤放大器(EDFA)被放大。放大后的混沌光被 99:1 的光纤耦合器(FC<sub>2</sub>)一分为二:混沌信号的 1%作为参考光,99%作为探测光。探测光经环形器(OC)发射至待测光纤(FUT),在光纤故障点 2 反射回来。两路光信号经光电探测器(PD)同时转化为电信号后,用示波器(OSC)进行数据采集。对采集到的参考信号和回波信号进行互相关处理,利用相关峰位置实现光纤故障点定位。实验中,光纤环是由 50:50 光纤耦合器直接熔接而成,光纤环周期为 1.5 ns(频率为 666 MHz)。DFB 中心波长稳定在 1549.57 nm,偏置电流设置为 18 mA(阈值电流为 11 mA),反馈强度为 -9.4 dB,反馈时延为 75 ns。用 47 GHz 光电探测器(XPDV2120R, u<sup>2</sup>t公司,德国)辅助频谱仪(26.5 GHz N9020A, 安捷伦科技公司,美国)获取混沌信号的全部频段信息,并用示波器(SDA 806Zi-A, 美国力科公司,美国)记录混沌信号的时序。

### 2.2 混沌特性分析

在进行光纤故障检测之前,首先分析混沌光通过光纤环前后的信号特性。实验中,通过光纤环前,混沌信号功率为 0.675 mW;通过光纤环后,混沌信号功率为 0.640 mW。图 2(a)所示为混沌光通过光纤环前后的全频段频谱,图 2(b)所示为 200 MHz 示波器带宽下,混沌光通过光纤环前后的时序。

从图 2(a)中可以看出,通过光纤环前后的混沌信号频谱有明显的区别:通过光纤环前,混沌信号频谱弛豫振荡特征明显,低频段(弛豫振荡频率之前)能量过低,能量幅度相差最大约 20 dB;通过光纤环后,混沌低频段能量大幅度提升,最大能量提升幅度可达 25 dB。图 2(b)记录了通过光纤环前后 0~200 MHz 频率范围内的混沌信号时序波形。可以明显看出:通过光纤环后,混沌信号波形振荡更加剧

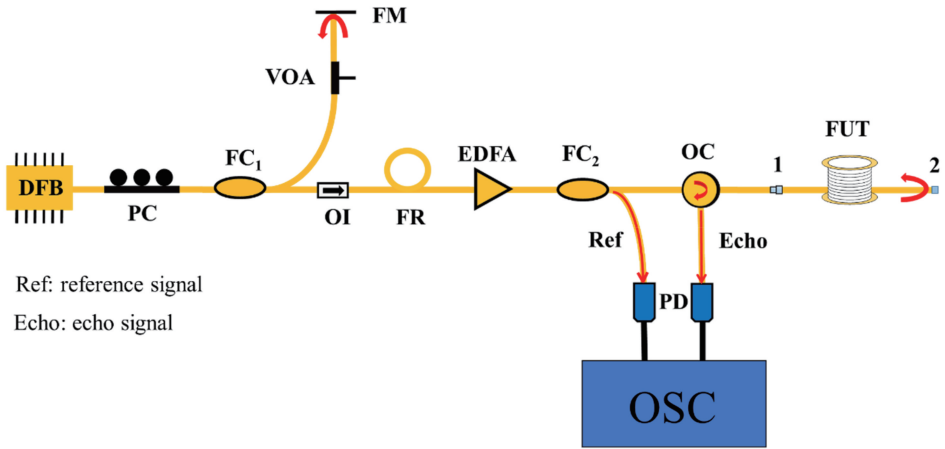


图 1 基于光纤环的混沌 OTDR 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of chaos OTDR based on FR

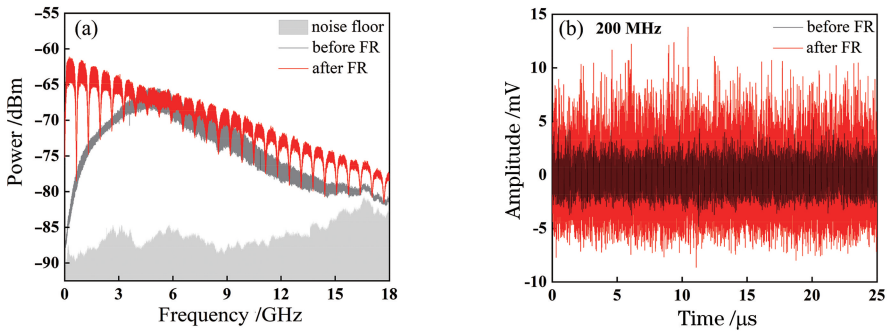


图 2 混沌光通过光纤环前后的信号特性。(a)频谱;(b)时序

Fig. 2 Properties of chaotic light before and after passing FR. (a) Radio-frequency spectra; (b) time series

烈,幅度变化更大。这表明在 200 MHz 带宽下,通过光纤环后混沌信号能量得到大幅度提升。根据相关算法原理<sup>[6]</sup>,理论上基于光纤环的混沌 OTDR 动态范围也将大幅度提升。需要指出的是,混沌信号通过光纤环后光谱并没有发生变化。此外,混沌光通过光纤环后,频谱具有 666 MHz 的谐振频率,这个问题将在后文讨论。

### 2.3 动态范围

本研究主要对反射事件进行讨论分析。因此,

将混沌 OTDR 的动态范围定义为对数形式:断开环形器接口 1 时,环形器接口 1 处的反射功率与基底噪声的 3 倍标准偏差相除,并对比值取  $5\lg(5 \text{ 倍的 } \lg)$ <sup>[14,27]</sup>。实验中,环形器接口 1 处的回波信号功率为 0.3 mW。图 3 描述了无光纤环时和有光纤环时混沌 OTDR 的动态范围。图中背景噪声处的虚线表示基底噪声的 3 倍标准偏差 ( $3\sigma$ )。对比图 3(a)和图 3(b),可以看出:混沌 OTDR 动态范围从无光纤环时的 10.5 dB 提升至有光纤环时的 15.5 dB,提

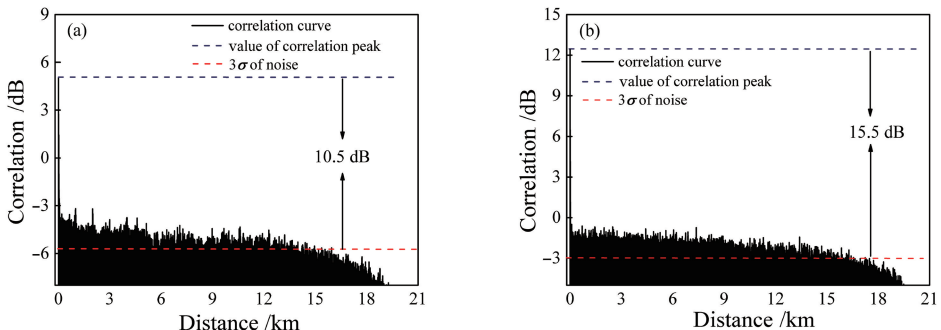


图 3 200 MHz 带宽下混沌 OTDR 的动态范围。(a)无光纤环;(b)有光纤环

Fig. 3 Dynamic ranges of chaos OTDR under 200-MHz bandwidth. (a) Without FR; (b) with FR

高了 5 dB。这意味着利用光纤环,混沌 OTDR 测量距离可以增加 25 km (单模光纤的损耗按 0.2 dB/km 计算)。同时发现,经过光纤环后,图 3 (b)中相关曲线的背景噪声提高了约 3 dB。其原因是混沌光经过光纤环时发生干涉,将激光器的相位噪声转化为了强度噪声<sup>[26,28]</sup>,从而在一定程度上增大了背景噪声。相关峰值的增加则是因为干涉使得相位混沌转化为了强度混沌,即增加了信号的能量,且相关峰值的增加大于噪声的增加。

### 2.4 测量结果

为研究有无光纤环对光纤故障点测量结果的影响,分别利用无光纤环和有光纤环的混沌 OTDR 对不同距离光纤故障点进行检测。图 4(a)

和图 4(b)分别表示无光纤环和有光纤环的混沌 OTDR 对 23.5 km 光纤故障点的测量结果。为了对比明显,对相关曲线进行了归一化处理。从图 4 中可以看出,无光纤环的混沌 OTDR 相关谱线在 23.5 km 处峰值非常小,只有 0.07,而基于光纤环的混沌 OTDR 相关谱线在 23.5 km 处峰值高达 0.54。将待测光纤延长至 49.4 km 时,无光纤环的混沌 OTDR 相关峰已被噪声淹没,无法实现光纤故障定位,如图 4(c)所示。而基于光纤环的混沌 OTDR 相关峰则依然明显,定位准确,如图 4(d)所示。两组对比结果说明:利用光纤环可以有效增大混沌 OTDR 的测量距离。这也是利用光纤环提升动态范围的体现。

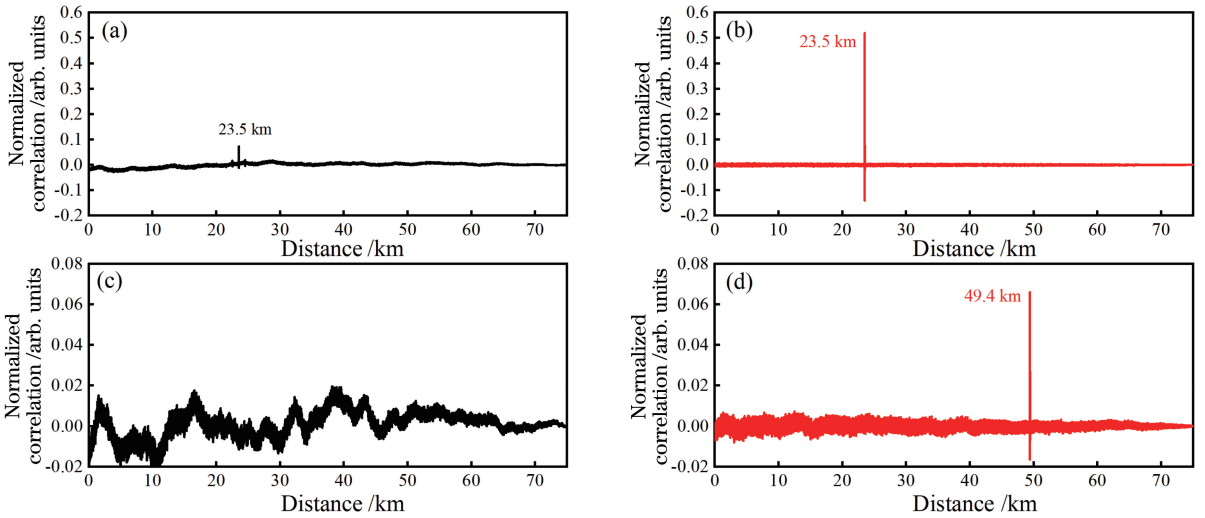


图 4 光纤故障点测量结果。(a)无光纤环时,23.5 km 光纤故障点测量结果;(b)有光纤环时,23.5 km 光纤故障点测量结果;(c)无光纤环时,49.4 km 光纤故障点测量结果;(d)有光纤环时,49.4 km 光纤故障点测量结果

Fig. 4 Detection results of fiber faults. (a) Detection result of 23.5-km fiber fault without FR; (b) detection result of 23.5-km fiber fault with FR; (c) detection result of 49.4-km fiber fault without FR; (d) detection result of 49.4-km fiber fault with FR

## 3 理论分析与讨论

为了探究混沌光通过光纤环后低频段能量提升的物理机制,对混沌光通过光纤环过程进行了数值模拟。采用单模 Lang-Kobayashi 速率方程模型<sup>[29]</sup>模拟外腔反馈半导体激光器。外腔反馈混沌的电场复振幅  $A = |A| \exp[i\varphi(t)]$  [ $\varphi(t)$  为相位,  $t$  为时间] 和载流子  $N$  的表达式为

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha)(G - \tau_p^{-1})A + \kappa_f A(t - \tau_f) \exp(-2\pi\nu_0 \tau_f), \quad (1)$$

$$\frac{dN}{dt} = J - \tau_N^{-1}N - G|A|^2, \quad (2)$$

式中:  $G = g_d(N - N_0)/(1 + \epsilon A^2)$ ;  $N_0$  为透明载流子密度;  $g_d$  为差分增益;  $\epsilon$  表示增益饱和系数;  $\alpha$  为线宽增强因子;  $\tau_p$  表示光子寿命;  $\kappa_f$  和  $\tau_f$  分别表示反馈强度、反馈时延;  $\nu_0$  为频率;  $\tau_N$  表示载流子寿命;  $J$  为偏置电流。具体的数值模拟参数参考文献 [30]。由 (1)~(2) 式模拟外腔反馈半导体激光器输出的光场  $E(t)$ ,  $E(t) = A \exp(i2\pi\nu_0 t)$ 。理论上,混沌光进入光纤环后,将在光纤环内循环。因此,光纤环的输出是多路延迟干涉的结果<sup>[26,31]</sup>,考虑到循环叠加,混沌光通过光纤环的输出可以表达为

$$E_o(t) = i\sqrt{k} \left[ E(t) - \sum_{n=1} (\sqrt{1-k})^n E(t - nT) \right], \quad (3)$$



式中:  $k$  为光纤环的耦合系数;  $T$  为光纤环的周期;  $n$  是混沌光在光纤环中循环的次数。在模拟中,  $k =$

0.5,  $T = 1.5$  ns。数值模拟得到混沌光通过光纤环前与光纤环后的频谱和时序, 如图 5 所示。

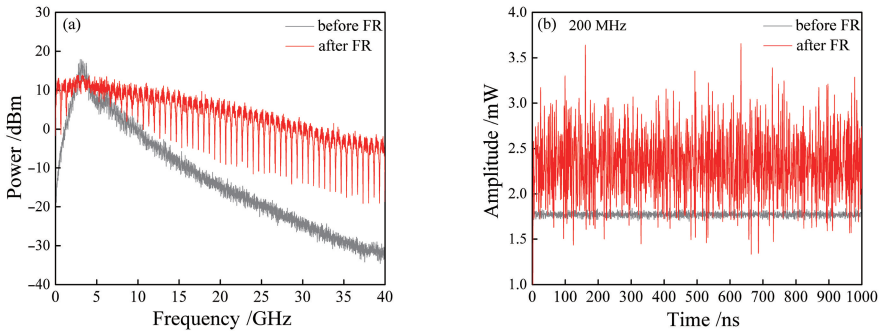


图 5 模拟的混沌信号通过光纤环前后的信号特性。(a) 频谱; (b) 时序

Fig. 5 Properties of simulated chaotic signal before and after passing FR. (a) Radio-frequency spectra; (b) time series

图 5(a) 为混沌光通过光纤环前后的频谱。很明显, 混沌光通过光纤环后频谱展宽, 低频段能量提升明显。在 0~200 MHz 频率范围内, 能量大约提高了 25 dB。相应地, 如图 5(b) 所示, 时序波形振荡更为剧烈, 幅度变化明显。数值模拟结果和实验结果基本吻合。研究发现, 通过光纤环后的混沌信号频谱和混沌激光器的相位频谱十分相似<sup>[26, 28]</sup>。因此, 认为光纤环能使低频能量提升的原因是光纤环引起的多光束干涉过程存在延迟自拍频效应, 可将混沌激光的相位动态非线性地转化到低频段。此外, 还发现只要光纤环的周期大于混沌光的相干时间, 这种现象就会一直存在<sup>[26]</sup>。这意味在实际应用中光纤环可以小型化和集成化。

需要指出的是, 由于光纤环的循环作用, 经过光纤环输出的混沌光具有周期性。从图 2(a)、图 5(a) 中可以看出通过光纤环后的频谱具有 666 MHz 谐振频率, 谐振频率为光纤环周期的倒数。当探测带宽大于谐振频率时, 混沌 OTDR 的故障定位功能就会受到干扰。为了避免周期性干扰, 以 200 MHz 带宽为例, 对基于光纤环的混沌 OTDR 进行实验验证。实际应用中, 可以通过减小光纤环周期来提高谐振频率, 这样就可以使用更高带宽的探测信号, 从而利用更多的混沌信号能量, 进一步增大动态范围。受限于 200 MHz 探测带宽, 混沌 OTDR 的动态范围仅增大了 5 dB。此外, 所提出的光纤环也同样适用于其他具有快速相位变化的混沌系统。

## 4 结 论

提出一种结构简单、成本低廉的光纤环用以增大混沌 OTDR 的动态范围。实验结果和理论分析表明: 混沌光在光纤环中发生的多光束干涉存在延

迟自拍频效应, 可使混沌信号低频段能量提升。以 200 MHz 带宽为例, 对有无光纤环时的混沌 OTDR 动态范围和故障测量结果进行了对比。结果表明: 利用光纤环, 混沌 OTDR 动态范围增大了 5 dB, 并实现了 49.4 km 的光纤故障定位。此外, 光纤环是可以小型化和集成化的, 这对于利用光纤环提高混沌信号低频段能量的实际应用具有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] Barnoski M K, Jensen S M. Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics [J]. *Applied Optics*, 1976, 15 (9): 2112-2115.
- [2] Li B, Zhang M, Zhou H, *et al.* Identifying optical cable faults in OTDR based on wavelet packet analysis and support vector machine [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(2): 021205.  
李斌, 张敏, 周恒, 等. 基于小波包分析和支持向量机的光时域反射仪光缆故障识别 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(2): 021205.
- [3] Keiser G. *Optical fiber communication* [M]. 5th ed. New York: McGraw-Hill Companies, 2015.
- [4] Zhang L M, Pan B W, Chen G C, *et al.* Long-range and high-resolution correlation optical time-domain reflectometry using a monolithic integrated broadband chaotic laser [J]. *Applied Optics*, 2017, 56 (4): 1253-1256.
- [5] Wang J, Ni Y, Guo Y, *et al.* Optical time domain reflectometry based on LabVIEW and detection analysis of reflection events [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 121205.  
王娟, 倪屹, 郭瑜, 等. 基于 LabVIEW 的光时域反射仪及反射事件检测分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 121205.
- [6] Wang A B. Broadband chaos generation and chaos

- OTDR [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.
- 王安帮. 宽带混沌产生与混沌光时域反射测量[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- [7] Takada K, Himeno A, Yukimatsu K. Resolution control of low-coherence optical time-domain reflectometer between 14 and 290  $\mu\text{m}$  [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1991, 3(7): 676-678.
- [8] Shentu G L, Sun Q C, Jiang X, *et al.* 217 km long distance photon-counting optical time-domain reflectometry based on ultra-low noise up-conversion single photon detector[J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 24674-24679.
- [9] Lee D, Yoon H, Kim P, *et al.* SNR enhancement of OTDR using biorthogonal codes and generalized inverses[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(1): 163-165.
- [10] 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.
- [11] Zou W W, Yu L, Yang S, *et al.* Optical pulse compression reflectometry based on single-sideband modulator driven by electrical frequency-modulated pulse[J]. *Optics Communications*, 2016, 367: 155-160.
- [12] Takahashi H, Toge K, Oda T, *et al.* Rayleigh-based OTDR with dynamic modal crosstalk suppression[J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 783-791.
- [13] Wang Y C, Wang B J, Wang A B. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(19): 1636-1638.
- [14] 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.
- [15] Xia L, Huang D, Xu J, *et al.* Simultaneous and precise fault locating in WDM-PON by the generation of optical wideband chaos[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(19): 3762-3764.
- [16] Yang C Y, Wang A B, Zhang Z X, *et al.* Correlation optical fiber fault locator based on chaotic laser and its experimental application research [J]. *Chinese Journal of 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.
- [17] Zhang L, Wang A B, Li K, *et al.* Fiber fault visible chaotic optical time domain reflectometry measurement method[J]. *Chinese Journal of 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.
- [18] Xie Z H, Xia L, Wang Y W, *et al.* Fiber fault detection with high accuracy using chaotic signal from an SOA ring reflectometry [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(8): 709-712.
- [19] Wang Z N, Fan M Q, Zhang L, *et al.* Long-range and high-precision correlation optical time-domain reflectometry utilizing an all-fiber chaotic source[J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 15514-15520.
- [20] Li S S, Liu Q, Chan S C. Distributed feedbacks for time-delay signature suppression of chaos generated from a semiconductor laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1930-1935.
- [21] Ke J X, Yi L L, Hou T T, *et al.* Time delay concealment in feedback chaotic systems with dispersion in loop [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 7200808.
- [22] Argyris A, Hamacher M, Chlouverakis K E, *et al.* Photonic integrated device for chaos applications in communications[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(19): 194101.
- [23] Zhang M J, Xu Y H, Zhao T, *et al.* A hybrid integrated short-external-cavity chaotic semiconductor laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(21): 1911-1914.
- [24] Lin F Y, Liu J M. Chaotic lidar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(5): 991-997.
- [25] Uchida A, Amano K, Inoue M, *et al.* Fast physical random bit generation with chaotic semiconductor lasers[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(12): 728-732.
- [26] Wang A B, Wang Y C, Yang Y B, *et al.* Generation of flat-spectrum wideband chaos by fiber ring resonator[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(3): 031112.
- [27] Anderson D R, Johnson L, Bell F G. Troubleshooting optical fiber networks: understanding and using optical time-domain reflectometers[M]. San Diego, California: Academic Press, 2004.
- [28] Wang A B, Yang Y B, Wang B J, *et al.* Generation of wideband chaos with suppressed time-delay signature by delayed self-interference [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8701-8710.
- [29] Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16

(3): 347-355.

[30] Wang A B, Wang Y C, Wang J F. Route to broadband chaos in a chaotic laser diode subject to optical injection[J]. Optics Letters, 2009, 34(8):

1144-1146.

[31] Capmany J, Ortega B, Pastor D. A tutorial on microwave photonic filters[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(1): 201-229.