

# 面向混沌光时域反射仪的混沌光源设计

乔翊<sup>1,2</sup>, 马珺<sup>1,2</sup>, 张建国<sup>1,2\*</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** 为满足光纤故障高精度诊断需求, 研制了一种面向混沌光时域反射仪(COTDR)的混沌光源模块, 该模块由宽带混沌信号源与激光器调制电路构成。其中, 宽带混沌信号源可产生频谱平坦且 10 dB 带宽达 500 MHz 的混沌电信号, 该信号经调制电路放大后, 驱动分布反馈式(DFB)半导体激光器可输出大功率、宽频带的混沌激光信号。所研制的混沌光源模块应用于光纤故障诊断中, 不仅可实现光纤断点、不匹配连接点的检测, 而且在 107 km 测量范围内, 可实现与距离无关的 0.35 m 空间分辨率。此外, 设计的混沌光源模块还可便捷地应用于混沌雷达、混沌保密通信等领域。

**关键词** 测量; 光时域反射仪; 混沌信号源; 混沌激光; 调制电路; 光纤故障定位

**中图分类号** TN29      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.021201

## Design of Chaotic Light Source for Chaos Optical Time Domain Reflectometry

Qiao Yi<sup>1,2</sup>, Ma Jun<sup>1,2</sup>, Zhang Jianguo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan, Shanxi 030024, China

**Abstract** In order to satisfy the requirement of high precision optical fiber fault diagnosis, we have developed a chaotic light source module, which is composed of a bandwidth chaotic signal source and a laser modulation circuit. Among them, the bandwidth chaotic signal source produces a chaotic electrical signal with flat frequency spectrum and 10 dB bandwidth up to 500 MHz. When the signal is amplified by the modulation circuit, the driving distributed feedback (DFB) semiconductor laser can output high power and broadband chaotic laser signal. When the chaotic source module is applied in optical fiber fault diagnosis, it can not only realize the detection of fiber breakpoints and mismatch junctions, but also achieve a range-independent spatial resolution of 0.35 m in the detection range of approximately 107 km. In addition, the chaotic source module can be conveniently applied to such fields as chaotic radar and chaotic secure communications.

**Key words** measurement; optical time domain reflectometry; chaotic signal source; chaotic laser; modulation circuit; fiber fault location

**OCIS codes** 120.4825; 140.1540; 140.3460

## 1 引言

光纤通信已成为现代通信的主要手段之一。受自然灾害及人为因素的影响, 光纤、光缆的损毁与故障事故不可避免, 由此而引发的正常通信大面积中断事件时有发生。对此, 及时、准确地找到光纤故障点位置并将其修复

**收稿日期:** 2016-09-18; **收到修改稿日期:** 2016-10-11

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金(51404165, 61601319)、山西省自然科学基金(201601D011047)、山西省高等学校创新人才支持计划

**作者简介:** 乔翊(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事混沌光时域反射仪方面的研究。E-mail: qiaoyi\_job@126.com

**导师简介:** 马珺(1980—), 女, 博士, 副教授, 主要从事新型传感器和探地雷达系统方面的研究。

E-mail: zymajun@126.com

\* **通信联系人.** E-mail: zhangjianguo@tyut.edu.cn

是唯一的解决办法,而光时域反射仪(OTDR)是国际电信联盟推荐的用于光纤测距、故障定位的专业仪器<sup>[1-3]</sup>。

传统的 OTDR 一般采用脉冲飞行法来确定光纤故障位置,它是利用一束脉冲激光作为探测信号注入被测光纤,通过测量反射脉冲光在发射端与目标(光纤故障反射点)之间的双程走时来获得距离信息<sup>[4]</sup>。该方法简单、易行,但是存在固有缺点,即测量距离与分辨率无法同时提高的原理性矛盾,这是因为要提高测量距离必须增加脉冲光的峰值功率或脉冲宽度,对于前者,过强的脉冲光会激发光纤中的非线性效应影响测量结果,甚至损毁光纤;而对于后者,测量分辨率会随脉冲宽度增加而降低,仅能达到数米甚至数十米。为解决这一问题,基于随机信号法<sup>[5]</sup>、相干法<sup>[6]</sup>、相关法<sup>[7-8]</sup>的 OTDR 技术被相继提出。

基于混沌相关法的光时域反射仪(COTDR)技术,因其具有与探测距离无关的高分辨率而得到广泛研究<sup>[9-11]</sup>。2008年,Wang Y C等<sup>[12]</sup>首次提出并实验验证了COTDR的可行性,他们利用分布反馈(DFB)激光器<sup>[13]</sup>和光纤环反馈作为混沌激光源,实现了空间分辨率为6 cm的故障定位;随后,基于半导体光放大器环腔的混沌激光源<sup>[14]</sup>、波长可调谐的混沌激光源<sup>[15]</sup>和宽光谱的混沌激光源<sup>[16-17]</sup>被相继提出并用于COTDR中,以实现波分及时分复用无源光网络的高精度故障检测。然而,上述COTDR中混沌激光均使用激光器加外部光学反馈元件产生,这些光学方式产生的混沌光信号功率小,较低的功率限制了其测量距离,仅为数十千米;此外,光反馈方式产生的混沌信号带有弱周期性,即所谓的时延特征,导致测量结果中出现周期性旁瓣(也称鬼峰),引发故障点位置的误判。美国联邦通信委员会规定只要信号在-10 dB处的相对带宽(信号绝对宽度与中心频率之比)小于10%即为窄带,介于10%~20%为宽带,大于20%为超宽带<sup>[18]</sup>。近年来,宽带混沌信号在保密通信、高精度测距、高速随机数产生等领域得到了广泛的应用。

本文研制了一种面向COTDR的新型混沌激光光源模块。该模块利用宽带混沌电信号对DFB激光器进行直接调制产生大功率、宽频带混沌激光,将其用于COTDR中可实现:1)大功率混沌激光可提高光纤故障探测距离;2)混沌激光无周期,可消除因探测信号存在周期性而引发的“鬼峰”,避免误判;3)混沌激光光源成本低、体积小,易实现嵌入式设计。光纤故障检测实验结果表明,使用本混沌激光光源模块的COTDR,可实现107 km的测量距离和与距离无关的0.35 m的空间分辨率。

## 2 混沌光源模块设计与实现

混沌光源模块包括宽带混沌信号源<sup>[19]</sup>与激光器直调电路两部分,其中,宽带混沌信号源用于产生宽频带(500 MHz)、大幅值的混沌射频(RF)信号;该信号经直调电路,调制DFB激光器输出宽带混沌激光。混沌光源模块结构框图如图1所示。

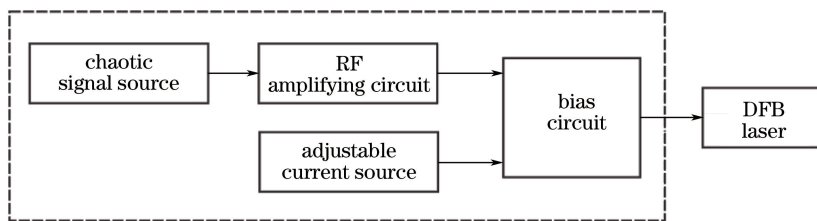


图1 混沌光源模块结构框图

Fig. 1 Architecture of the chaotic light source module

### 2.1 宽带混沌信号源

宽带混沌信号是一类噪声、无周期信号,可以由非线性的光学或电路系统产生。本研究利用布尔混沌电路产生宽带混沌信号,电路原理如图2所示,其基本结构是一个由单结点组成的带有延时反馈的自治布尔网络,结点是一个三输入的异或非门(XNOR)。图中,XNOR的输出信号分别经3个不同路径反馈到输入端,而 $\tau_{n1}$ 、 $\tau_{n2}$ 和 $\tau_{n3}$ 分别表示路径的传输延迟时间,通过级联数量不等( $n1$ 、 $n2$ 和 $n3$ )的非门可以实现传输延迟时间的控制。

布尔混沌电路可方便地使用分立或集成的数字逻辑器件实现,如本研究使用了Altera公司的MAX II系列EPM1270T型芯片。当 $n1=2$ 、 $n2=6$ 、 $n3=10$ 时,布尔混沌电路产生混沌信号的时序如图3(a)所示,其信号最大幅值约2.1 V;频谱如图3(b)所示,其10 dB带宽可达500 MHz,且十分平坦;自相关曲线图[图3

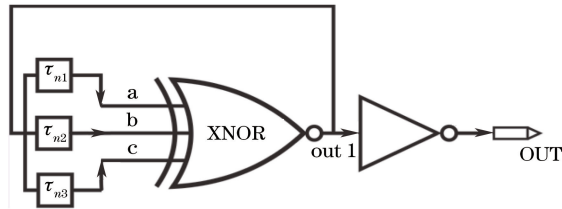


图 2 布尔混沌电路

Fig. 2 Boolean chaos circuit

(c)呈现类  $\delta$  函数的形状,且无周期性旁瓣。此外,从图 3(c)中插图可见,混沌信号自相关曲线的半峰全宽 (FWHM) 仅为 1.3 ns,表明其十分适合于高分辨率(厘米级)的 COTDR 应用。

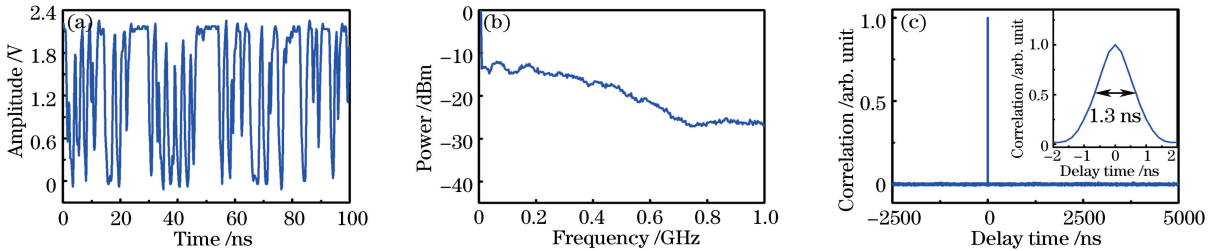


图 3 (a)布尔混沌电信号;(b)频谱图;(c)自相关曲线

Fig. 3 (a) Boolean chaotic electric signal; (b) spectrogram; (c) correlation curve

## 2.2 激光器直调电路的设计与实现

本研究设计的激光器直调电路主要由三部分构成:可调节电流源、宽带射频信号放大电路以及偏置电路。各部分电路具体结构详述如下。

### 2.2.1 可调节电流源

可调节电流源提供 DFB 激光器所需的直流偏置电流,其最大输出电流能力为 200 mA,其原理如图 4 所示。电路核心为负压稳压器 TPS7A30,其输出电压  $V_{out}$  由电阻 R8、R9 和可调电位器  $V_{x2}$  决定,计算公式为

$$V_{out} = \left( \frac{R_8 \times R_{Vx2}}{R_8 + R_{Vx2}} \times \frac{1}{R_2} + 1 \right) \times V_{FB} \quad (1)$$

电压信号经电阻 R14 转化为电流信号与激光器 LD 串联,由激光器工作特性可知,其两端电压恒定为 1.1 V,因此,输出电流为 80 mA。激光器两端反向并联二极管 D2 用于吸收激光器上的反向浪涌电压,防止激光器被击穿。

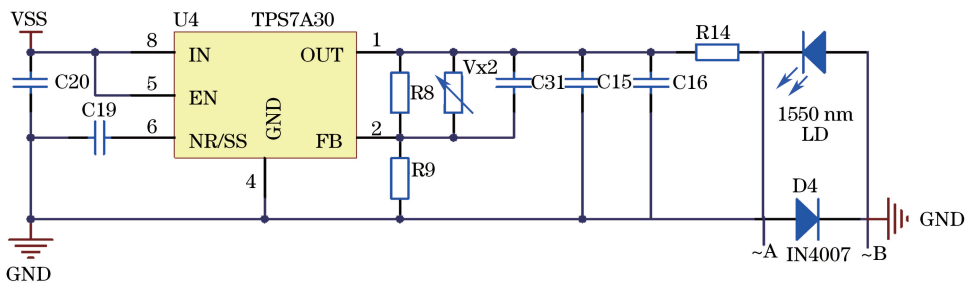


图 4 可调节电流源

Fig. 4 Adjustable current source

### 2.2.2 射频放大电路

射频放大电路用于放大调制激光器的宽带混沌信号,以增强其功率,其设计带宽为 500 MHz,可控线性增益范围可达 45 dB。射频放大电路原理如图 5 所示,其核心为可变增益放大器 AD8367,通过调节 AD8367 引脚 GAIN 上的电压  $V_{Rf}$  即可实现增益控制;而电压  $V_{Rf}$  的大小可由电阻 R15、R16 及 VRF1 的分压比来控制。电路工作时,宽带混沌电信号经 SMA 接口输入到 AD8367 的 INPT 引脚,放大后的混沌信号经 VOUT 引脚输出至偏置电路。

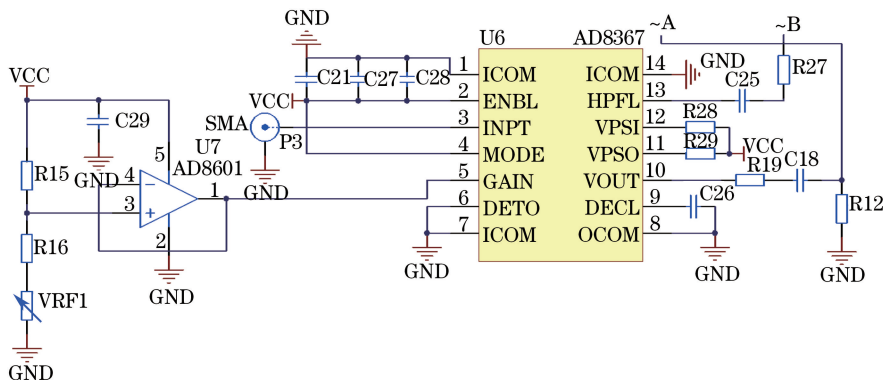


图 5 射频增益放大电路

Fig. 5 Radio frequency gain amplifying circuit

### 2.2.3 偏置电路

偏置电路用于实现高频的宽带混沌信号与直流偏置电流的耦合叠加,其原理如图 6 所示,主要由射频扼流圈 L5 和电容 C17 构成,电路中使用的电容为  $10\ \mu\text{F}$ ,对高频信号呈现低阻抗特性,以保证宽带混沌信号无失真耦合到激光器中;而射频扼流圈 L5(ADCH-80A,  $50\sim 8000\ \text{MHz}$ )本质上相当于大电感,起着通低频阻高频的作用,既保证直流偏置电流的通过,又阻止高频宽带混沌信号进入电流源。

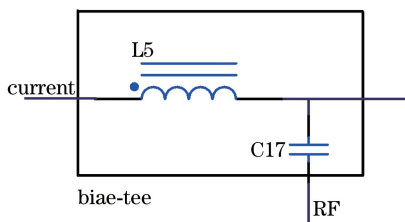


图 6 偏置电路

Fig. 6 Bias-tee circuit

### 2.3 混沌光源模块测试

为了检验所研制混沌激光光源模块的性能,对其进行了测试分析。混沌光源模块所用激光器为 Optics 公司生产的中心波长为  $1550\ \text{nm}$  的 DFB 激光器,其阈值电流为  $35\ \text{mA}$ ,功率为  $4\ \text{mW}$ 。实验中,设置可调节电流源的偏置电流为  $80\ \text{mA}$ ,射频放大电路增益为  $3\ \text{dB}$ 。输出混沌激光信号如图 7 所示,图 7(a)、(b)、(c)分别为时序、频谱、自相关曲线。受光电探测器  $200\ \text{MHz}$  带宽的限制,混沌光信号的实际有效带宽约为  $155\ \text{MHz}$ 。经光功率计(THORLABS PM20A)测量,此时被调制激光器的出光功率达到其设计的最大光功率  $4\ \text{mW}$ 。

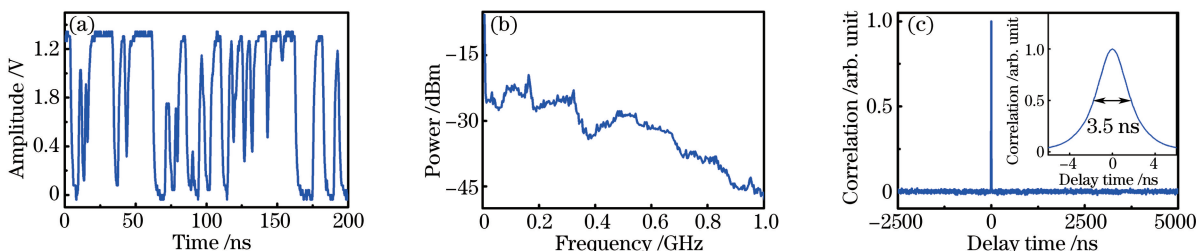


图 7 (a)布尔混沌光信号;(b)频谱图;(c)自相关曲线

Fig. 7 (a) Boolean chaotic light signal; (b) spectrogram; (c) correlation curve

## 3 COTDR 实验装置及测量结果

为了检验所研制混沌光源模块的性能,搭建了如图 8 所示的 COTDR 实验装置,进行了光纤故障检测实验。由混沌光源模块产生的混沌激光经过  $99:1$  的光纤耦合器(OFC)分为两路, $99\%$ 作为探测光信号经光纤

环行器(OC)注入被测光纤,1%作为参考光信号;由光纤故障点反射的探测光信号与参考光信号经光电探测器(APD)转换为电信号,并通过数据采集卡进行同步采集,所得数据再进行互相关计算,通过相关峰值即可获得光纤故障点位置。

实验中选用的耦合器型号为 SSWC-2X2-P-1315 (Tianjin Opeak)、环形器型号为 CIR-1X2-P-1315 (Tianjin Opeak);光电探测器(Beijing Conquer,型号:KG-APR-200M)的灵敏度和带宽分别为-42 dBm 和 200 MHz;数据采集卡(PicoScope 3206D)的带宽和采样率分别为 200 MHz 和 1 SGa/s。

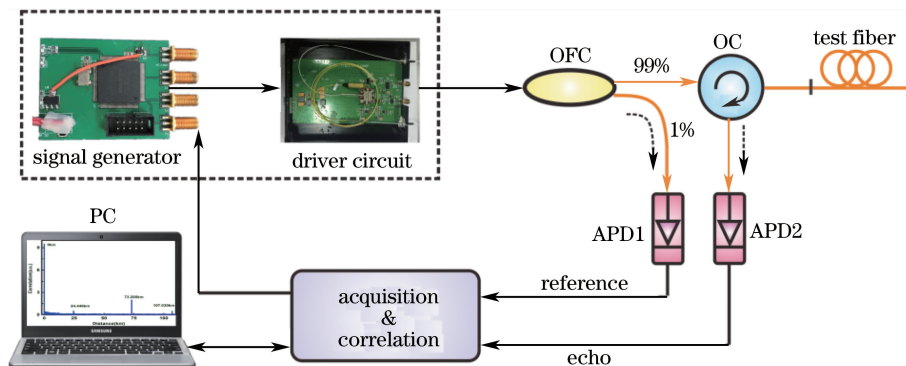


图 8 COTDR 实验装置图

Fig. 8 Experimental setup of COTDR

### 3.1 光纤故障检测实验

实验中,被测单模光纤总长度为 107 km,共设置了 3 处模拟故障点:故障点 1 和 2 分别为 44 km 和 80 km 处的两个光纤连接点(故障点 1 为 PC/PC 连接,故障点 2 为 APC/PC 连接),故障点 3 为 107 km 处的光纤末端。图 9 为 COTDR 测量结果,混沌信号空间分辨率的大小取决于其相关峰值的半峰全宽,由布尔混沌光信号自相关曲线可知其半峰全宽为 0.35 ns。空间分辨率定义为

$$f = c \times \tau_{\text{FWHM}} / 2n, \quad (2)$$

式中  $c$  为光速, $n$  为光纤折射率,因此 0 点的分辨率为 0.35 m。为了验证空间分辨率与距离无关,将连接点处的反射峰放大,实验选取了 44、107 km 两处反射峰与 0 点处比较,从图 9 插图(a)、(b)可以看出在 44、107 km 两处反射峰的半峰全宽都为 0.35 m,可实现与距离无关的 0.35 m 的空间分辨率。

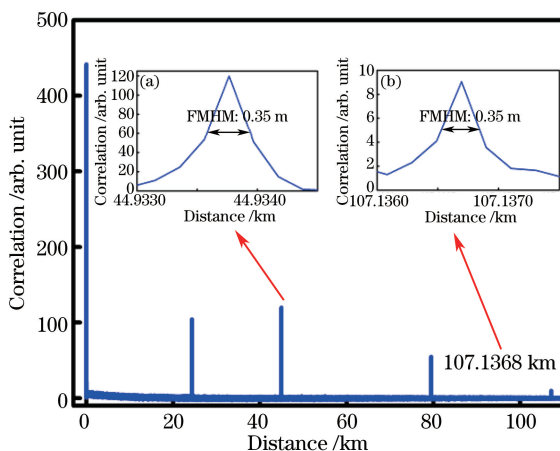


图 9 (a) 44 km; (b) 107 km 处混沌测距结果

Fig. 9 Chaos ranging result at (a) 44 km; (b) 107 km

### 3.2 密集反射事件检测

为了测试 COTDR 中对密集故障反射事件的区分能力,在两段长度分别为 20.626 km 和 20 km 的单模光纤中间接入了一段长度为 1 m 的单模光纤跳线,跳线与两段长光纤使用 PC 端子连接,利用两个 PC 连接器模拟了两个间距很近的密集反射事件,实验结果如图 10 所示,可以看到,两个反射峰清晰地反映出了两处反射事件。

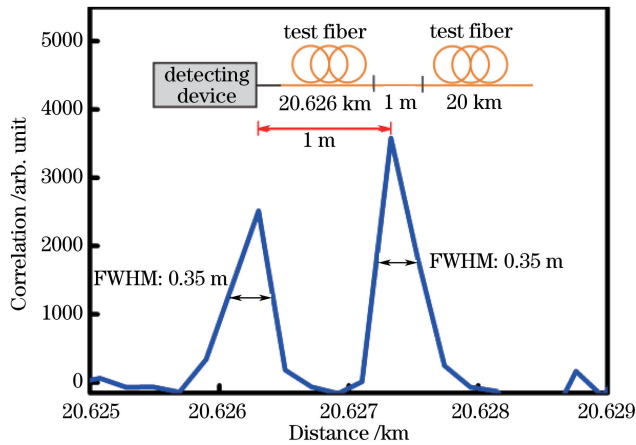


图 10 密集反射事件检测

Fig. 10 Detection results of dense reflection events

## 4 结 论

设计并研制了一种面向 COTDR 的混沌光源模块,包含混沌信号源和激光器驱动电路的设计。信号源可产生宽频带、相关性好的布尔混沌信号,经驱动电路调制激光器产生宽带混沌激光用于 COTDR 中,可实现 107 km 与距离无关的 0.35 m 的高精度测量。所设计的光源模块设计简单、成本低、功耗低,可满足 OTDR 系统的各类高精度检测,并可实现产品化。

## 参 考 文 献

- [1] Barnoski M K, Jensen S M. Fiber waveguide: a novel technique for investigating attenuation characteristics[J]. Applied Optics, 1976, 15(9): 2112-2115.
- [2] Li Ke, Yang Fei, Chen Fenghua. Principle and application of optical time domain reflect-meter[J]. Shanxi Science and Technology, 2010, 25(2): 46-47.  
李 科, 杨 飞, 陈峰华. OTDR 原理及其应用[J]. 山西科技, 2010, 25(2): 46-47.
- [3] Cai Zhigang, Jin Ke, Li Weiliang, *et al.* Manufacture of optical time domain reflectmeter [J]. Semi-Conductor Optoelectronics, 2002, 23(1): 48-51.  
蔡志岗, 靳 珂, 李伟良, 等. 光时域反射仪(OTDR)的研制[J]. 半导体光电, 2002, 23(1): 48-51.
- [4] Healey P. Instrumentation principles for optical time domain reflectometry [J]. Journal of Physics E Scientific Instruments, 1986, 19(5): 334-341.
- [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): 5318-6326.
- [6] Lu L D, Song Y J, Zhu F, *et al.* Coded optical time domain reflectometry using three frequency multiplexing probe[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2012, 50(12): 1735-1739.
- [7] Jones K R, Trevino G I S, Jonsson R H. Sequence time domain reflectometry using complementary Golay codes: US6885954[P]. 2005-04-26.
- [8] Wang Guochao, Yan Shuhua, Yang Jun, *et al.* Theoretical modeling analysis for precise space ranging based on cross-correlation of femtosecond optical frequency comb[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0412002.  
王国超, 颜树华, 杨 俊, 等. 基于飞秒光梳互相关的空间精密测距理论模型分析[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0412002.
- [9] Wang Yuncai. Generation and applications of chaotic laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(4): 13-21.  
王云才. 混沌激光的产生与应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(4): 13-21.
- [10] Wu Yuan, Wang Bingjie, Wang Yuncai. Research progress in applications of chaotic laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 060005.  
武 媛, 王冰洁, 王云才. 混沌激光应用研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6): 060005.

- [11] Wang Yuncai, Wang Anbang. Range finding with chaotic laser with high resolution non-affected by ranging distance [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2016, 4(5): 80-84.  
王云才, 王安邦. 距离无关的高精度混沌激光测距[J]. 光学与光电技术, 2016, 4(5): 80-84.
- [12] Wang Y C, Wang B J, Wang A B. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode [J]. Photonics Technology Letters, 2008, 20(19): 1636-1638.
- [13] Xue Pingping, Yang Lingzhen, Zhang Jianzhong, *et al.* Dynamic characteristics of semiconductor ring laser with high bias current [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0202002.  
薛萍萍, 杨玲珍, 张建忠, 等. 半导体环形激光器高偏置电流下的动态特性[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0202002.
- [14] 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]. Photonics Technology Letters, 2013, 25(8): 709-712.
- [15] 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.
- [16] Xu N J, Yang L Z, Zhang J, *et al.* Fault detection technique for wavelength division multiplexing passive optical network using chaotic fiber laser [J]. Optical Fiber Technology, 2014, 20(2): 163-167.
- [17] 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.
- [18] Yu Jiangwei. Method of targets detection and tracking in wideband radar [D]. Xi'an: Xidian University, 2012: 1-4.  
于江微. 宽带雷达目标检测与跟踪方法 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012: 1-4.
- [19] Yan Qiurong, Cao Qingshan, Zhao Baosheng, *et al.* High speed random number generator based on digitizing bandwidth-enhanced chaotic laser signal [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(11): 1102004.  
鄢秋荣, 曹青山, 赵宝升, 等. 基于数字化带宽增强混沌激光信号的高速随机源 [J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1102004.