

# 双向光纤环形混沌激光器相邻帧相似性的实验研究

秦海娟<sup>1,2</sup> 方 捻<sup>1,2</sup> 王陆唐<sup>1,2</sup> 黄肇明<sup>1,2</sup> 吴春旭<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072

<sup>2</sup>上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072

**摘要** 双向半导体光放大器(SOA)光纤环形混沌激光器输出波形呈帧型结构, 相邻帧波形具有相似性且受到外界扰动时其相似性下降。为了获得相似性高且一致性好的混沌波形以准确检测扰动的发生, 实验研究了影响该激光器相邻帧相似性的各种因素, 包括SOA性能及其驱动电流、系统结构的对称性、输出耦合比以及光纤环长。以相邻帧互相关峰值的平均值考察其相似性, 最大偏差衡量其一致性。结果发现, 具有偏振保持特性的光功率放大器(BOA)是最适合的有源器件, 且其驱动电流越大, 相邻帧相似性越好。只要调整偏振控制器使得输出混沌波形呈连续窄带谱的类正弦信号, 则系统结构的对称与否、耦合比和光纤环长都不影响其相邻帧的相似性, 但光纤环长却影响系统的灵敏度。考察了系统的工作稳定性, 5 min左右相邻帧相似性的波动在 $10^{-3}$ 量级。

**关键词** 非线性光学; 传感器; 光纤环形激光器; 半导体光放大器; 互相关

中图分类号 O437; TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.081402

## Experimental Investigation of Adjacent-Frame Similarity of Bidirectional Optical Fiber Ring Chaotic Laser

Qin Haijuan<sup>1,2</sup> Fang Nian<sup>1,2</sup> Wang Lutang<sup>1,2</sup> Huang Zhaoming<sup>1,2</sup> Wu Chunxu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China

<sup>2</sup>School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China

**Abstract** The output waveforms of a bidirectional optical fiber chaotic ring laser based on semiconductor optical amplifier (SOA) present frame structures. The adjacent-frame waveforms have the characteristic of similarity, which declines when the laser suffers an external disturbance. In order to obtain waveforms with high similarity and good consistency for accurate detection of disturbances, experimental investigations on various factors which can affect the adjacent-frame similarity of the laser are carried out, including the performances and drive current of SOAs, symmetry of system structure, output coupling ratios and optical fiber ring lengths. The similarity levels are investigated by the mean values of the adjacent-frame cross-correlation peaks. The consistency degrees are measured by the maximum deviation of the peaks. The results show that the booster optical amplifier (BOA) with the polarization-maintaining property is the most suitable active device. The bigger the drive current, the better the adjacent-frame similarity. By only adjusting polarization controller to make the output chaotic waveform look like sine signal with continuous narrow-band spectrum, the symmetry of system structure, coupling ratios and optical fiber ring lengths will not affect the adjacent-frame similarity. However, the ring lengths affect the system sensitivity. Moreover, the system stability is also investigated. The adjacent-frame similarity fluctuates at  $10^{-3}$  level within about five minutes.

**Key words** nonlinear optics; sensor; optical fiber ring laser; semiconductor optical amplifier; cross-correlation

**OCIS codes** 140.3560; 060.4370; 130.6010

收稿日期: 2013-11-06; 收到修改稿日期: 2014-01-20; 网络出版日期: 2014-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(61108004)、上海市科学技术委员会(11ZR1413300)、上海市重点学科项目(S30108)

作者简介: 秦海娟(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事混沌分布式光纤传感方面的研究。E-mail: shuqhj@163.com

导师简介: 方 捻(1972—), 女, 博士, 教授, 主要从事光通信与光传感等方面的研究。

E-mail: nfang@staff.shu.edu.cn(通信联系人)

## 1 引言

近年来,混沌激光的应用受到越来越广泛的关注,已有多种混沌产生和混沌应用的激光器系统<sup>[1-12]</sup>。Jáuregui等<sup>[1]</sup>将光脉冲注入到一个无源的光纤环形谐振腔得到了混沌输出信号。由光反馈或光电反馈构成光纤环形激光器可以产生混沌输出<sup>[5-8]</sup>。杨蓉等<sup>[11]</sup>利用掺铒光纤环形激光器,实验实现了多波长混沌激光的输出。王陆唐等<sup>[12]</sup>利用半导体光放大器(SOA)构成单向光纤环形激光器产生了偏振混沌激光。方捻等<sup>[13-14]</sup>判定了此激光器的输出信号为混沌信号,发现其输出波形具有帧型结构,相邻帧波形具有很大相似性,两者的互相关函数峰值可达0.8以上,受到扰动后则降低。利用这些特点,提出了基于该激光器的光纤分布传感系统,监测相邻帧混沌波形的互相关函数峰值的变化,即可检测环路上是否有扰动发生<sup>[14-15]</sup>。然而,基于SOA的单向光纤环形激光器对外界扰动的灵敏度较低且响应较慢。在此激光器的基础上,对其进行改进,提出一种双向光纤环形激光器的有源传感系统,实验发现,双向激光器较单向激光器对外界扰动敏感并且响应更快。

为了得到相邻帧相似性高、一致性好的混沌传感系统,以准确检测扰动的发生。在系统对外界扰动敏感的前提下,本文通过实验考察了影响输出波形相邻帧相似性的各种因素,包括SOA的性能和驱动电流、耦合器的耦合比、光纤环的长度以及系统结构等。通过计算相邻帧互相关峰值的平均值考察其相似性高低,以互相关峰值的最大偏差衡量其一致性好坏,以一定时间间隔的相邻帧互相关峰值的平均值和最大偏差的波动衡量其稳定性。

## 2 双向光纤环形激光器结构

图1为双向半导体光纤环形激光器(bi-SFRL)的两种结构示意图,其中图1(a)为对称结构,图1(b)为非对称结构。此激光器主要由SOA、偏振控制器(PC)、光耦合器(OC)以及标准单模光纤构成。在此激光器中,SOA工作于双向非线性放大状态。光纤环中光的偏振态受到PC控制,PC采用General Photonics公司的光纤挤压器(PLC-001)。大部分光经过OC后重新进入环内,继续循环形成受激振荡,另一小部分光由OC输出,经光电探测器(PD)转换后,进入PicoScope 5203数字示波器(所用采样率为500 MS/s)采集数据。这里的对称和非对称结构是指环中OC两端的光纤长度是否相等。在对称结构中,OC两端的光纤均为数千米长,而非对称结构中,一端光纤长度仍为数千米,而另一端只是1 m长的OC尾纤。

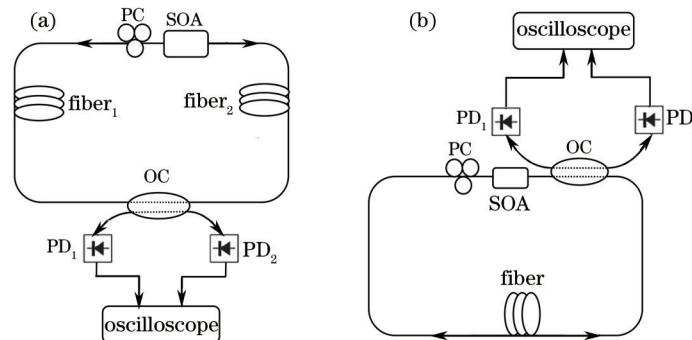


图1 双向半导体光纤环形激光器的两种结构。(a) 对称结构; (b) 非对称结构

Fig.1 Two structures of bi-directional semiconductor fiber ring lasers. (a) Symmetric structure; (b) asymmetric structure

## 3 影响混沌波形相邻帧相似性的因素

在系统对外界扰动敏感但又未施加扰动的前提下,以相邻帧的相似性为目标,通过改变系统的结构、器件及其参数,比较所得混沌波形相邻帧相似性的大小和一致性,从而得到各个因素对双向半导体光纤环形激光器性能的影响,进而确定适于扰动检测的光纤传感系统的最佳的系统结构、器件及其参数。

### 3.1 SOA性能的影响

SOA是bi-SFRL中唯一的有源器件,首先考察SOA的性能对相邻帧相似性的影响。

这里用到3种SOA,分别为美国THORLABS公司的光功率放大器BOA模块BOA1004S、英国CIP Technologies公司和瑞士OptoSpeed公司的SOA模块SOA-S-C-14-FCA和SOA1550MRI/X-1500。以下

分别简称 BOA、CIP SOA 和 OptoSpeed SOA。BOA 是一个高饱和输出功率、宽带宽和偏振保持的光放大器。CIP SOA 具有低驱动电流、低偏振依赖以及低噪声的特点。OptoSpeed SOA 具有高增益、低偏振依赖及高饱和输出功率的特点。

为了了解实际使用中 3 种 SOA 的性能,在一定注入电流下,分别测量每种 SOA 两端输出的自发辐射光谱的峰值波长、峰值功率、平均功率及 3 dB 光谱宽度。实验室所设温度为 22 °C。BOA 和 OptoSpeed SOA 的驱动电流均为 480 mA(最大驱动电流均为 750 mA),CIP SOA 的驱动电流为 130 mA(最大驱动电流为 150 mA)。结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,3 个 SOA 两端输出的光谱峰值波长、3 dB 光谱宽度、峰值功率与平均功率之差分别为 0.48 nm、0 nm、1.4 nm;0.6 nm、0 nm、0.3 nm;1.04 dBm、0.05 dBm、0.68 dBm;1.04 dBm、0.06 dBm、0.89 dBm。三者的自发辐射参数除了 3 dB 带宽的差异,没有明显的优劣差别。

表 1 BOA、CIP SOA 和 OptoSpeed SOA 的自发辐射参数

Table 1 Spontaneous radiation parameters of BOA, CIP SOA and OptoSpeed SOA

| SOA type      | SOA port | Wavelength at peak power /nm | 3 dB optical bandwidth /nm | Peak power /dBm | Mean power /dBm |
|---------------|----------|------------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|
| BOA           | Input    | 1542.32                      | 79.2                       | -28.42          | 1.83            |
|               | Output   | 1542.8                       | 79.8                       | -27.38          | 2.87            |
| CIP SOA       | Input    | 1515.4                       | 67.6                       | -30.00          | -0.3            |
|               | Output   | 1515.4                       | 67.6                       | -29.95          | -0.24           |
| OptoSpeed SOA | Input    | 1556.92                      | 27.3                       | -23.46          | 2.4             |
|               | Output   | 1558.32                      | 27                         | -22.78          | 3.29            |

将 3 种 SOA 分别用于图 1(a)所示的对称结构的半导体光纤环形激光器中,其中耦合器的耦合比为 20%,光纤 1 和 2 的长度分别为 3 km。

图 2 是 3 种 SOA 对应的 bi-SFRLs 的顺时针方向(CW)输出波形的相邻帧互相关峰值图。横轴为帧数,纵轴为相邻帧互相关的归一化峰值。从图 2 中可直观地看出,BOA 构成的 bi-SFRL 的输出波形,其相邻帧互相关峰值最高,均在 0.99 以上,且一致性最好,连续 63 帧波形的相邻帧互相关峰值几乎在一条直线上。而另外 2 种 SOA 构成的 bi-SFRLs 的输出波形,其相邻帧互相关峰值尽管也比较高,但一致性差,一个随波形帧数增加逐渐下降,另一个则缓慢上升,这对扰动的准确检测都是不利的,逐渐下降的趋势更为不利。为了定量描述相邻帧相似性的高低及其一致性,引入相邻帧互相关峰值的平均值与最大偏差来描述相邻帧互相关峰值的大小和波动程度。

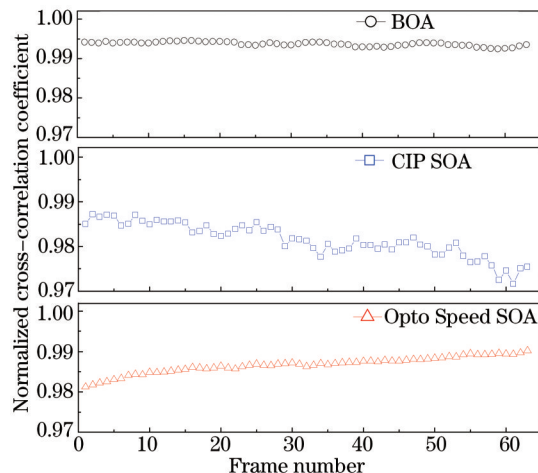


图 2 基于 3 种 SOA 的 bi-SFRLs 顺时针方向输出波形的相邻帧互相关峰值图

Fig.2 Cross-correlation peaks of adjacent-frame CW waveforms from bi-SFRLs based on three types of SOAs

此激光器 CW 和逆时针方向(CCW)双向输出波形的相邻帧互相关峰值的平均值与最大偏差如表 2 所示。从表 2 中可以看出,与其他 SOA 相比,基于 BOA 的 bi-SFRL 的相邻帧互相关峰值的平均值最大,最大偏差最小,即其相邻帧相似性最高且一致性最好,而且两个方向输出波形的相邻帧相似性一样好,可以任意选取其中一个方向的输出进行检测。对比 3 个 SOA 的性能,认为是由于 BOA 的偏振特性,使得由它构成的 bi-

SFRL的相邻帧相似性比较高,也比较一致。虽然厂家声称其BOA具有偏振保持特性,但同时给出其偏振消光比为18 dB。因此,厂家所谓的偏振保持特性严格讲应该是单偏性。由于BOA波导结构的设计,不管输入的是什么偏振态,输出都变为某种固定状态,即BOA相当于普通SOA加上一个检偏器。光的偏振态是混沌环形激光器的重要初始条件。单偏性使光每次从BOA输出时其偏振态都归零一次,即回到检偏器所指定的状态。每环行一周后偏振态都归零一次,相邻帧混沌光自然不会变化太多,其相似性也就比较高且一致。

表2 基于3种SOA的bi-SFRLs双向输出波形的相邻帧互相关峰值的平均值及最大偏差

Table 2 Mean and maximum deviations of cross-correlation peaks of adjacent-frame CW and CCW waveforms from bi-SFRLs based on three types of SOAs

| SOA type      | Mean (CW) | Maximum deviation (CW) | Mean (CCW) | Maximum deviation (CCW) |
|---------------|-----------|------------------------|------------|-------------------------|
| BOA           | 0.9937    | 0.0010                 | 0.9951     | $8.9409 \times 10^{-4}$ |
| CIP SOA       | 0.9905    | 0.0024                 | 0.9815     | 0.0098                  |
| OptoSpeed SOA | 0.9867    | 0.0055                 | 0.9305     | 0.0142                  |

### 3.2 系统结构的影响

在BOA驱动电流 $I=480$  mA、光纤环的长度为6 km以及耦合器的耦合比为20%时,分别用图1(a)、(b)所示的对称与非对称两种结构采集激光器的输出波形,计算相邻帧互相关峰值的平均值与最大偏差,结果发现,无论是对称结构还是非对称结构,只要适当地调整PC使得激光器输出的混沌波形的频谱较窄,时域波形类似正弦信号,如图3所示,则它们双向输出波形的相邻帧互相关峰值的平均值都很高,最大偏差也都很小,如表3所示。器件都没有变,只是调换一下在环中的位置,其输出自然是不会改变的。另外,从图3中局部放大的插图可看出,时域波形看似正弦信号,但其频谱为连续谱,且根据文献[13]中方法计算,得到李雅普诺夫(Lyapunov)指数大于零,证明此时双向光纤环形激光器输出的依然为混沌信号。既然对称和非对称结构的系统性能没有差异,实际使用时方便起见可采用非对称结构,只把光纤铺设到检测区域,其他器件放在监控室内。

需要指出的是,混沌用于保密通信时,为了提高通信的保密性,希望混沌的带宽越大越好,但用于传感时,为了保持相邻帧相似性的一致性,则混沌带宽不宜太宽。

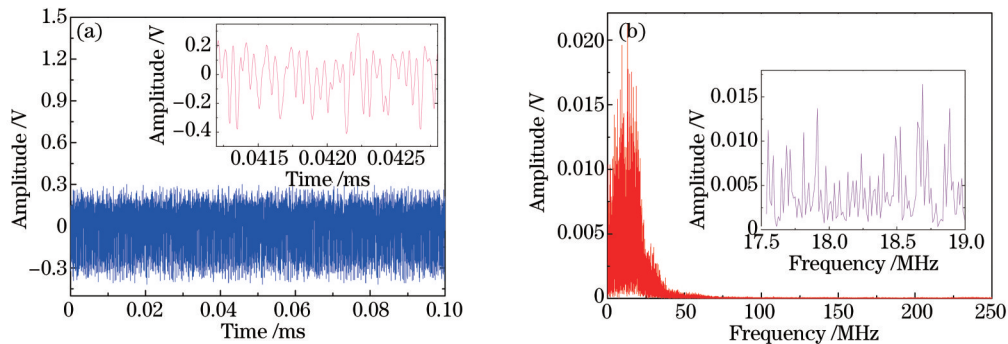


图3 相邻帧相似性高且一致性好的(a)混沌波形及其(b)频谱

Fig.3 (a) Chaotic waveform and (b) frequency spectrum with high similarity and good consistency of adjacent-frame

表3 对称与非对称结构的bi-SFRLs双向输出波形的相邻帧互相关峰值的平均值及最大偏差

Table 3 Mean and maximum deviations of cross-correlation peaks of adjacent-frame CW and CCW waveforms from bi-SFRLs with symmetric and asymmetric structures

| Structure  | PC state | Mean (CW) | Maximum deviation (CW)  | Mean (CCW) | Maximum deviation (CCW) |
|------------|----------|-----------|-------------------------|------------|-------------------------|
| Symmetric  | 1        | 0.9909    | 0.0010                  | 0.9939     | 0.0005                  |
| Asymmetric | 1        | 0.9985    | $8.1682 \times 10^{-5}$ | 0.9986     | $8.3833 \times 10^{-5}$ |
| Symmetric  | 2        | 0.9979    | $3.0765 \times 10^{-4}$ | 0.9981     | $1.7670 \times 10^{-4}$ |
| Asymmetric | 2        | 0.9970    | $6.7893 \times 10^{-4}$ | 0.9976     | $7.2899 \times 10^{-4}$ |

### 3.3 耦合器耦合比的影响

分别选用耦合比为10%、30%和50%的耦合器作为非对称结构bi-SFRLs的输出耦合器。BOA的驱动电



流仍为 480 mA, 光纤环的长度为 6 km, 3种耦合比的情况下 bi-SFRLs 双向输出波形的相邻帧互相关峰值的平均值及最大偏差, 如表 4 所示。

表 4 不同耦合比的 bi-SFRLs 双向输出波形的相邻帧互相关峰值的平均值及最大偏差

Table 4 Mean and maximum deviations of cross-correlation peaks of adjacent-frame CW and CCW waveforms from bi-SFRLs with different coupling ratios

| Coupling ratio | Mean (CW) | Maximum deviation (CW)  | Mean (CCW) | Maximum deviation (CCW) |
|----------------|-----------|-------------------------|------------|-------------------------|
| 10%            | 0.9926    | $9.7812 \times 10^{-4}$ | 0.9950     | $9.8030 \times 10^{-4}$ |
| 30%            | 0.9958    | $9.3875 \times 10^{-4}$ | 0.9962     | $7.2199 \times 10^{-4}$ |
| 50%            | 0.9953    | $7.9430 \times 10^{-4}$ | 0.9958     | $4.7819 \times 10^{-4}$ |

从表 4 中可看出, 3个不同耦合比的 bi-SFRLs 输出波形的相邻帧互相关峰值的平均值和最大偏差相差不大。只要耦合比不大于 50%, 输出波形的相邻帧相似性基本一样, 耦合比无需刻意选择, 不妨选择 30%。

### 3.4 SOA 驱动电流的影响

SOA 是 bi-SFRL 的主要器件, 因此 SOA 驱动电流的改变会对激光器输出特性产生一定的影响。从 100 mA 到 500 mA, 每隔 100 mA 选取一个 SOA 驱动电流值, 研究不同电流对 bi-SFRL 输出波形相邻帧相似性的影响。从表 5 可以看出, 随着 SOA 驱动电流的逐渐变大, bi-SFRL 输出波形的相邻帧互相关峰值的平均值相差不大, 但最大偏差明显减小。当 SOA 的驱动电流为 100 mA 时, 各个 PC 状态下, bi-SFRL 的输出波形多为较大自脉冲信号和较小混沌信号的叠加。随着电流的逐渐变大, 激光器输出波形的混沌成分越来越明显, 相邻帧相似性的一致性越来越好。这说明相邻帧的相似性确实是混沌的特征, 不是自脉冲造成的。因此, SOA 的驱动电流仍取 480 mA。

表 5 不同驱动电流时 bi-SFRLs 双向输出波形的相邻帧互相关峰值的平均值及最大偏差

Table 5 Mean and maximum deviations of cross-correlation peaks of adjacent-frame CW and CCW waveforms from bi-SFRLs with different drive currents

| Drive current /mA | Mean (CW) | Maximum deviation (CW)  | Mean (CCW) | Maximum deviation (CCW) |
|-------------------|-----------|-------------------------|------------|-------------------------|
| 100               | 0.9925    | 0.0035                  | 0.9941     | 0.0039                  |
| 200               | 0.9900    | 0.0014                  | 0.9928     | 0.0012                  |
| 300               | 0.9936    | 0.0011                  | 0.9954     | 0.0013                  |
| 400               | 0.9914    | $9.0925 \times 10^{-4}$ | 0.9940     | 0.0013                  |
| 500               | 0.9932    | $9.8956 \times 10^{-4}$ | 0.9950     | 0.0010                  |

### 3.5 光纤环长度的影响

利用图 1(b)所示的非对称系统结构, BOA 的驱动电流为 480 mA, 耦合器的耦合比取 30%, 忽略各个器件的尾纤长度, 分别用若干盘纤构成 6 km、3 km 和 1 km 的光纤环, 所得的 bi-SFRLs 双向输出波形的相邻帧互相关峰值的平均值及最大偏差如表 6 所示。从表 6 中可以看出, 改变光纤环的长度, bi-SFRLs 双向输出波形的相邻帧互相关峰值的平均值及最大偏差会发生小的变化, 相邻帧的相似性的一致性逐渐变好。但是随着光纤环长的减小, 系统对扰动的灵敏度逐渐降低。这从另一个角度也说明, 可以根据需要通过改变光纤环的长度来控制系统的灵敏度和相邻帧相似性的一致程度。

表 6 不同光纤环长度的 bi-SFRLs 双向输出波形的相邻帧互相关峰值的平均值及最大偏差

Table 6 Mean and maximum deviations of cross-correlation peaks of adjacent-frame cw and ccw waveforms from bi-SFRLs with different fiber ring lengths

| Fiber ring length /km | Mean (CW) | Maximum deviation (CW)  | Mean (CCW) | Maximum deviation (CCW) |
|-----------------------|-----------|-------------------------|------------|-------------------------|
| 6                     | 0.9849    | 0.0017                  | 0.9887     | 0.0025                  |
| 3                     | 0.9909    | 0.0013                  | 0.9931     | 0.0014                  |
| 1                     | 0.9941    | $6.9132 \times 10^{-4}$ | 0.9952     | 0.0015                  |

## 4 相邻帧相似性的稳定性

对影响 bi-SFRLs 的双向输出波形相邻帧相似性的因素做过实验对比分析以后, 找到了令激光器输出

波形的相邻帧相似性高且一致性好的系统结构、器件以及参数。但如果这些结果随时间变化很大,也就没实际意义了。所以,系统的稳定性也要通过实验进行考察。选用非对称系统结构,BOA做光放大器,耦合比为30%,光纤环的长度为6 km,BOA的驱动电流为480 mA。在同样的PC状态下,对连续1 h内大约间隔5 min得到的bi-SFRLs双向输出波形计算其相邻帧互相关峰值的平均值及最大偏差,结果如图4所示。

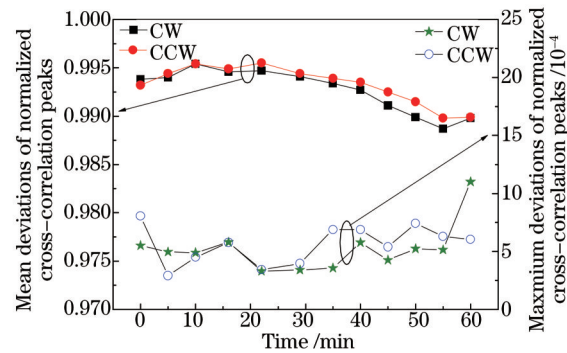


图4 不同时刻bi-SFRLs双向输出波形的相邻帧互相关峰值的平均值及最大偏差

Fig.4 Mean and maximum deviations of cross-correlation peaks of adjacent-frame CW and CCW waveforms from bi-SFRLs at different time

从图4可以看出,在同样的PC状态下,间隔5 min左右得到的不同时刻bi-SFRLs双向输出波形的相邻帧互相关峰值的平均值及最大偏差变化不大,波动都在 $10^{-3}$ 量级,有些甚至达 $10^{-4}$ 量级,说明输出波形的相邻帧相似性不仅高、一致性好,而且稳定性也好。这里5 min的时间间隔其实已经很长了,因为是动态比较相邻帧相似性的变化来检测扰动的发生的,只需相邻几帧的相似性不变。即便对一个10 km长的光纤环,一帧的时长仅约 $10^4/(2 \times 10^8) = 50 \mu\text{s}$ 。

## 5 结论

针对单向光纤环形激光器对外界扰动的灵敏度低且响应慢的不足,提出一种双向光纤环形激光器的有源传感系统。为了提高双向系统检测扰动的准确性,以输出波形相邻帧的相似性为目标,比较了不同因素下输出波形相邻帧的相似性和一致性。对比了3种SOA构成的激光器相邻帧的相似性,确定了具有偏振保持特性的光功率放大器BOA作为最适合的有源器件。进一步改变系统结构的对称性、耦合器的耦合比、BOA的驱动电流以及光纤环的长度。发现较大的驱动电流下,系统输出的混沌成分也较多,相邻帧相似性更好。说明相邻帧的相似性确实是一帧帧混沌的特征,不是一个个自脉冲造成的。只要调整PC使得输出混沌波形呈连续窄带谱的类正弦信号,则系统结构的对称与否、输出耦合器的耦合比和光纤环的长度都不影响相邻帧的相似性,但光纤环长却影响系统的灵敏度。因此,可以根据需要改变光纤环的长度来控制系统的灵敏度。对连续1 h内大约间隔5 min得到的双向输出波形的相邻帧相似性的实验观察显示,5 min左右相邻帧相似性的波动均在 $10^{-3}$ 量级,说明系统很稳定。

## 参考文献

- 1 Cesar Jáuregui, José M López-Higuera, Adolfo Cobo, *et al.*. Multiparameter sensor based on a chaotic fiber-ring resonator[J]. *J Opt Soc Am B*, 2006, 23(10): 2024-2031.
- 2 Y Wu, Z Qiao, M Zhang, *et al.*. Chaotic dynamics of active optical fiber ring resonator with optical injection [J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(12): 1139-1141.
- 3 Zhang Yuanfang, Yang Lingzhen. Theoretical and experimental study of chaos generation with single optical feedback in the He-Ne laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0102003.  
张元芳, 杨玲珍. 单反馈He-Ne激光器混沌激光产生的理论及实验研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0102003.
- 4 Jiang Long, Xia Guangqiong, Wu Jiagui, *et al.*. Optimization analysis on complex degree of optical chaos in a semiconductor laser with double optical feedback[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1202003.  
蒋 龙, 夏光琼, 吴加贵, 等. 双光反馈半导体激光混沌高复杂度优化分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1202003.
- 5 Y Wang, B Wang, A Wang. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode[J]. *IEEE Photon*

- Technol Lett, 2008, 20(19): 1636–1638.
- 6 M Zhang, T Liu, P Li, *et al.*. Generation of broadband chaotic laser using dual-wavelength optically injected Fabry-Pérot laser diode with optical feedback[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2011, 23(24): 1872–1874.
- 7 R Lang, K Kobayashi. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1980, 16(3): 347–355.
- 8 F Y Lin, J M Liu. Nonlinear dynamical characteristics of an optically injected semiconductor laser subject to optoelectronic feedback[J]. Opt Commun, 2003, 221(1–3): 173–180.
- 9 Hu Hanping, Su Wei, Yu Zhiliang, *et al.*. Chaos generation of variable parameters and secure communication based on optoelectronic feedback oscillation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0506006.  
胡汉平, 苏威, 于志良, 等. 基于动态参数的光电延迟振荡系统及其保密通信研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0506006.
- 10 Zhang Qiao, Pan Wei, Li Nianqiang, *et al.*. Investigation on security enhancement of chaotic optical communication systems via coupling delay[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0102009.  
张巧, 潘炜, 李念强, 等. 利用耦合时延增强激光混沌系统安全性能研究[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0102009.
- 11 Yang Rong, Zhang Li, Yang Lingzhen. Experimental investigation on multi wavelength chaos of erbium-doped fiber ring laser[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0114001.  
杨蓉, 张丽, 杨玲珍. 多波长混沌掺铒光纤环形激光器实验研究[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0114001.
- 12 Lutang Wang, Weijia Wu, Nian Fang, *et al.*. Experimental study on chaotic optical communication with PolSK modulation technology[C]. SPIE, 2005, 6021: 60210s.
- 13 Fang Nian, Wang Lutang, Guo Shuqin, *et al.*. Security of polarization-shift keying chaos optical communication system [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(6): 812–817.  
方捻, 王陆唐, 郭淑琴, 等. 偏振态移位键控光混沌通信系统的保密性[J]. 光学学报, 2006, 26(6): 812–817.
- 14 Fang Nian, Shan Chao, Wang Lutang, *et al.*. Study of the fiber distributed sensing system based on a polarization chaos ring laser[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2010, 21(3): 335–339.  
方捻, 单超, 王陆唐, 等. 基于偏振混沌环形激光器的光纤分布传感系统[J]. 光电子·激光, 2010, 21(3): 335–339.
- 15 Shan Chao, Fang Nian, Wang Lutang, *et al.*. Chaotic fiber fence system and intrusion location method[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 335–339.  
单超, 方捻, 王陆唐, 等. 混沌光纤围栏系统及其入侵定位方法[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 335–339.