

doi:10.3788/gzxb20184710.1014003

# 基于弱谐振腔法布里-珀罗激光器获取中心波长可调谐的带宽可控混沌信号

刘林杰, 邓涛, 吴正茂, 田志富, 夏光琼

(西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715)

**摘 要:** 基于两个弱谐振腔法布里-珀罗激光器, 提出并实验研究了一种获取中心波长可调谐、混沌带宽可控的混沌信号产生方案。该方案是通过一个可调谐光纤布喇格光栅反馈弱谐振腔法布里-珀罗激光器(定义为主弱谐振腔法布里-珀罗激光器)输出的混沌光单向注入到另一个弱谐振腔法布里-珀罗激光器(定义为副弱谐振腔法布里-珀罗激光器)来实现的。研究结果表明: 通过改变可调谐光纤布喇格光栅滤波器的中心波长以及反馈回路的反馈强度, 主弱谐振腔法布里-珀罗激光器可输出中心波长在可调谐光纤布喇格光栅滤波器可调谐范围调谐的混沌信号; 把主弱谐振腔法布里-珀罗激光器输出的混沌信号进一步注入到副弱谐振腔法布里-珀罗激光器中, 通过改变注入强度和频率失谐, 可产生中心波长可调谐、带宽可大范围调节的混沌信号。

**关键词:** 弱谐振腔法布里-珀罗激光器; 光纤布喇格光栅; 混沌光注入; 混沌带宽

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)10-1014003-8

## Generation of Tunable Chaotic Signal with Controllable Bandwidth Based on Weak-resonant-cavity Fabry-Perot Laser Diodes

LIU Lin-jie, DENG Tao, WU Zheng-mao, TIAN Zhi-fu, XIA Guang-qiong

(School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** A scheme for generating tunable chaotic signals with controllable bandwidth was proposed and experimentally demonstrated based on two weak-resonant-cavity Fabry-Perot laser diodes, which is realized by that the chaotic signal from a weak-resonant-cavity Fabry-Perot laser diode (named as master weak-resonant-cavity Fabry-Perot laser diode) with tunable fiber Bragg grating optical feedback is unidirectionally injected into another weak-resonant-cavity Fabry-Perot laser diode (named as slave weak-resonant-cavity Fabry-Perot laser diode). The experimental results show that, through adjusting the central wavelength of tunable fiber Bragg grating and feedback strength, master weak-resonant-cavity Fabry-Perot laser diode can output chaotic signal whose central wavelength can be tuned within the tunable range of tunable fiber Bragg grating. Further injecting the chaotic signal from master weak-resonant-cavity Fabry-Perot laser diode into slave weak-resonant-cavity Fabry-Perot laser diode, the bandwidth of the tunable chaotic signal can be adjusted within a large range by varying the injection power and detuning frequency.

**Key words:** Weak-resonant-cavity Fabry-Perot laser diode; Fiber Bragg grating; Chaotic optical injection; Chaotic bandwidth

**OCIS Codes:** 140.5960; 120.2230; 140.3600; 190.4360

**基金项目:** 国家自然科学基金(Nos. 61475127, 61575163, 61775184, 61875167), 重庆市自然科学基金(No. CSTC2016jcyjA0082)和中央高校专项业务费(No. XDJK2017B012)资助

**第一作者:** 刘林杰(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体激光非线性动力学. Email: alajashija01@163.com

**导师(通讯作者):** 夏光琼(1970-), 女, 教授, 博导, 主要研究方向为半导体激光非线性动力学及其应用. Email: gqxia@swu.edu.cn

**收稿日期:** 2018-05-31; **录用日期:** 2018-07-23

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

自 PECORA 和 CARROL 于 1990 年首次证实混沌同步以来,光混沌保密通信已经引起了人们的广泛关注<sup>[1-9]</sup>.光混沌保密通信系统采用类噪音的混沌信号作为发射端混沌载波来加载所需的传输信号,而在接收端基于混沌滤波效应和混沌同步机理即可实现传输信号的恢复.这种混沌保密通信方式已经在希腊雅典的城域网中被实验证实,2.4 Gbit/s 的信息在 120 km 的光纤信道传输后的误码率可达到  $10^{-3}$ <sup>[10]</sup>.随后, LAVROV 等于 2010 年利用该城域网进一步实现了 10 Gbit/s 的信息在 120 km 光纤信道的传输,其误码率可达  $10^{-6}$ <sup>[11]</sup>.尽管上述现场实验已经成功验证了光混沌保密通信的可行性,然而光混沌保密通信的真正实用化仍然需要进一步解决诸如系统的安全性、传输距离及通信容量等一系列问题.

目前,提升光混沌保密通信系统容量主要有两种途径:一是通过提高单信道混沌载波的带宽或采用特殊的编码方式以增加单信道信息传输速率.迄今为止,研究者利用连续光注入外部扰动下的激光器<sup>[12-14]</sup>或利用混沌光注入自由运行的激光器<sup>[15-20]</sup>已经从实验和理论上获得了带宽加强的混沌载波信号.利用这种带宽加强的混沌载波信号理论上可实现速率达 20 Gbit/s 的信息传输<sup>[21]</sup>.最近,KE 等基于 10 GHz 带宽的光电器件,利用双二进制编码方式实现了 30 Gbit/s 信息在 100 km 单模光纤上的传输,其误码率低于  $3.8 \times 10^{-3}$ <sup>[22]</sup>.另一种增加系统通信容量的方式是采用多信道传输,如基于波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)技术的混沌保密通信系统.PAUL 等基于两个发射激光器和一个接收激光器实现了低串扰的双信道单向混沌保密通信<sup>[23]</sup>;MATSUURA 等利用两对单向耦合的 Nd:YVO<sub>4</sub> 微芯片激光器,从理论和实验上实现了 100 KHz 和 60 KHz 的两路信号在系统中的单向混沌保密传输<sup>[24]</sup>;ZHANG 等理论研究了一路混沌光通信和一路传统光纤通信的波分复用传输<sup>[25]</sup>;JIANG 等理论证实了基于多模激光器的安全性增强的 WDM 光混沌保密通信系统<sup>[26]</sup>;ARGYRIS 等基于光子集成电路产生的 10 GHz 带宽的混沌载波,利用希腊雅典城域网实现了码率为 1.25 Gbit/s 的信号在 WDM 系统两个波长信道中 116 km 的远距离单向传输,该系统在使用前向纠错方法后使通信误码率达到  $10^{-12}$ <sup>[27]</sup>.上述研究从理论和实验两方面证实了基于 WDM 的光混沌保密通信的可行性.然而,目前的研究大多采用多对匹配的激光器分别作为通信系统的发射端和接收端,由于每对激光器需要满足参量匹配的要求,这无疑极大地增加了系统的成本和组网难度.同时,目前报道的结果大多只是两个通道混沌保密通信的复用.此外,考虑到目前国际电信联盟(International Telecommunication Union,ITU)建议的 WDM 系统信道间隔为 0.8 nm(100 GHz),若载波信号的谱宽超过信道间隔,这必然会引起信道间严重的串扰.因此,寻求一种中心波长可调谐、带宽可控的混沌载波源已经成为构建基于 WDM 的光混沌保密通信系统的必然要求.

近年来,与普通的法布里-珀罗半导体激光器相比,弱谐振腔法布里-珀罗半导体激光器(Weak-Resonant-Cavity Fabry-Perot Laser Diodes, WRC-FPLD)<sup>[28-29]</sup>具有更低的前端面反射率和更长的腔长可在较大的范围内实现多纵模输出,因而受到人们的关注.最近,本课题组报道了基于滤波光反馈 WRC-FPLD 可获得中心波长在 1 544~1 556 nm 大范围调谐混沌信号输出的实验结果<sup>[30]</sup>.在本文中,我们进一步提出一个利用可调谐光纤布喇格光栅滤波器(Fiber Bragg Grating, FBG)外腔主弱谐振腔法布里-珀罗半导体激光器(Master Weak-Resonant-Cavity Fabry-Perot Laser Diode, M-WRC-FPLD)输出的混沌信号单向注入到副弱谐振腔法布里-珀罗半导体激光器(Slave Weak-Resonant-Cavity Fabry-Perot Laser Diode, S-WRC-FPLD)获得中心波长可调谐、带宽可控的宽带混沌信号产生方案.通过选择合适的注入功率及两个激光器相应模式间的频率失谐,该系统输出混沌信号的中心波长可实现大范围可调,且其带宽在 10~30 GHz 范围内可调.

## 1 实验装置

图 1 为基于 WRC-FPLD 产生中心波长可调谐、带宽可控混沌信号的实验系统示意图.实验中 M-WRC-FPLD 和 S-WRC-FPLD 的前端面反射率约为 1%,腔长分别约为 630  $\mu\text{m}$  和 640  $\mu\text{m}$ ,其偏置电流和温度由超低噪声激光驱动源(ILX-Lightwave, LDC-3724)控制.M-WRC-FPLD 的输出光经过光环形器(OC<sub>1</sub>)后由分光比为 50:50 的光纤耦合器(FC<sub>1</sub>)分为两部分.一部分经掺铒光纤放大器(EDFA<sub>1</sub>)、可调衰减器(VA<sub>1</sub>)、可调 FBG 滤波器(调谐范围为 1 544.00~1 556.00 nm,3 dB 带宽为 0.28 nm)、偏振控制器(PC<sub>1</sub>)、FC<sub>3</sub> 和 OC<sub>1</sub> 后回到 M-WRC-FPLD 形成反馈环.另一部分经 FC<sub>2</sub>、EDFA<sub>2</sub>、光隔离器(ISO)、PC<sub>2</sub>、VA<sub>2</sub>、OC<sub>2</sub> 后注入

到 S-WRC-FPLD,其输出经  $OC_2$  和一个分光比为 20 : 80 的  $FC_4$  后进入探测系统.其中,20%的光输入到光谱分析仪(OSA, Ando AQ6317C)进行光谱分析;另外 80%的光经  $VA_3$  和一个分光比为 20 : 80 的  $FC_5$  后,80%的光由光电探测器( $PD_1$ , XPDV2120R, 50 GHz 带宽)转换成电信号后输入到 67 GHz 带宽的电谱分析仪(ESA, R&S@FSW)进行电谱分析,另外 20%的光由光电探测器( $PD_2$ , New Focus 1544-B, 12 GHz 带宽)转换成电信号后输入到 16 GHz 带宽的数字示波器(OSC, Agilent DSO-X91604A, 80 Gbit/s 采样速率)进行时间序列检测. $PC_1$ 、 $PC_2$  分别用于控制反馈光和注入光的偏振态,光功率计(PM)用于监控反馈光和注入光的强度.在本文中,反馈强度采用在图中 A 点处测得的反馈光的功率  $\kappa$  来标定,而注入光功率  $\eta$  则采用图中 B 点处测得的功率标定.

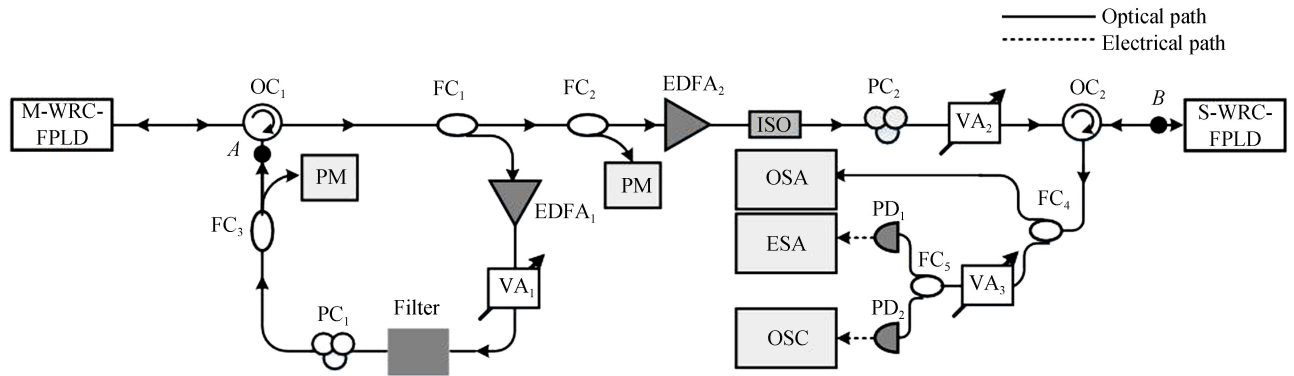


图 1 实验系统结构  
Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

## 2 实验结果与分析

整个实验中, M-WRC-FPLD 的温度固定在  $16.02^\circ\text{C}$ , 其阈值电流  $I_{\text{mth}} = 22.51 \text{ mA}$ . 图 2(a) 给出了偏置电流  $I_m = 35.00 \text{ mA}$  ( $\approx 1.56 I_{\text{mth}}$ ) 时 M-WRC-FPLD 自由运行的光谱. 可以看出, 在  $1530 \sim 1580 \text{ nm}$  的波长范围内, 包含了 87 个纵模, 模式间距约为  $0.57 \text{ nm}$ . 通过调节 M-WRC-FPLD 反馈环中 FBG 滤波器的中心波长及反馈环的反馈强度, 可使激光器输出中心波长在调谐范围内调谐的混沌信号<sup>[30]</sup>. 图 2(b) 是自由运行 S-WRC-FPLD 在温度为  $17.08^\circ\text{C}$  (此时其阈值电流  $I_{\text{sth}} = 27.50 \text{ mA}$ )、偏置电流  $I_s = 28.00 \text{ mA}$  ( $\approx 1.02 I_{\text{sth}}$ ) 时的光谱. 此时, 激光器在  $1530 \sim 1580 \text{ nm}$  的波长范围内输出了 89 个纵模, 其模式间距约为  $0.56 \text{ nm}$ . 利用 M-WRC-FPLD 输出的中心波长可调谐的混沌信号注入到 S-WRC-FPLD, 通过选择合适的注入功率  $\eta$  和频率失谐  $\Delta f$  ( $\Delta f = f_m - f_s$ ,  $f_m$  和  $f_s$  分别为自由运行 M-WRC-FPLD 和 S-WRC-FPLD 中拟被选择作为激射模式所对应的频率), 可实现对 S-WRC-FPLD 输出混沌信号带宽进行控制. 实验过程中, 频率失谐的大小通过调节 S-WRC-FPLD 的温度来控制, 温度变化步长为  $0.1^\circ\text{C}$ , 对应的频率失谐变化步长约为  $2.5 \text{ GHz}$ . 另外, 本实验中 M-WRC-FPLD 和 S-WRC-FPLD 的偏置分别固定在  $I_m = 35.00 \text{ mA}$ ,  $I_s = 28.00 \text{ mA}$  两个电流. M-WRC-FPLD 的偏置电流相对较高的原因是为了能提供更大的输出强度, 结合系统中掺铒光纤放大器

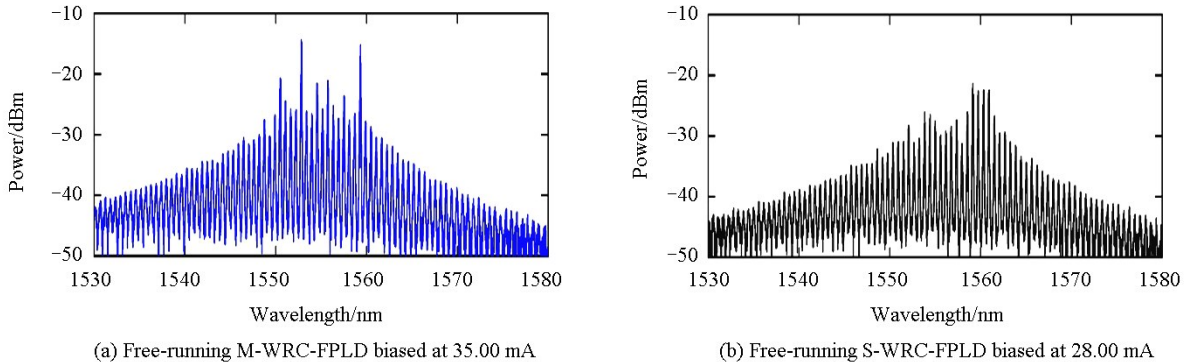


图 2 光谱  
Fig.2 Optical spectra

(EDFA<sub>2</sub>)、可调衰减器 (VA<sub>2</sub>), 可为 M-WRC-FPLD 提供较大范围内变化的注入光强; S-WRC-FPLD 偏置电流较低是为了使光注入后其输出的中心波长更易于实现大范围调谐。

## 2.1 不同反馈条件下 M-WRC-FPLD 产生的混沌信号特性

图 3 给出了 FBG 的中心波长取三个不同值, 在特定的反馈功率下, M-WRC-FPLD 输出的光谱(第一列)、功率谱(第二列)以及时间序列(第三列), 其中第二列中的浅灰色曲线代表噪声底。图 3(a) 对应第一种情形 (Case 1): 调节 FBG 中心波长且反馈功率  $\kappa = 5.21 \mu\text{W}$ , 此时, M-WRC-FPLD 激射波长位于  $1549.880 \text{ nm}$ , 边模抑制比为  $33 \text{ dB}$ 。结合此时的功率谱和时间序列, 可判定此时激光器工作在混沌态, 其混沌带宽约为  $9.27 \text{ GHz}$  (本文的混沌带宽采用有效带宽 (Effective Bandwidths, EBW) 来标定<sup>[31]</sup>)。图 3(b) 对应第二种情形 (Case 2): 调节 FBG 的中心波长且  $\kappa = 2.50 \mu\text{W}$ , 此时, M-WRC-FPLD 可输出激射在波长更长的邻近模式、边模抑制比为  $32 \text{ dB}$  的混沌信号, 此时混沌信号的  $\text{EBW} = 9.65 \text{ GHz}$ 。继续调节 FBG 的中心波长, 当  $\kappa = 2.30 \mu\text{W}$  时, M-WRC-FPLD 激射在下一个邻近的模式, 此时输出中心波长位于  $1551.040 \text{ nm}$ 、边模抑制比为  $33 \text{ dB}$ 、 $\text{EBW} = 9.50 \text{ GHz}$  的混沌信号, 如图 3 中的第三种情形 (Case 3)。需要说明的是, 尽管利用可调谐 FBG 滤波反馈能实现 WRC-FPLD 输出混沌信号的中心波长大范围调谐, 本文只选取了以上三个相邻模式 ( $1549.880 \text{ nm}$ 、 $1550.450 \text{ nm}$ 、以及  $1551.040 \text{ nm}$ ) 来研究将其作为混沌光注入到 S-WRC-FPLD 的情形。值得注意的是, 此时相邻模式之间的波长差异与自由运行时略微有不同, 其原因是 FBG 提供的滤波反馈导致激光器激射的中心波长发生了变化。

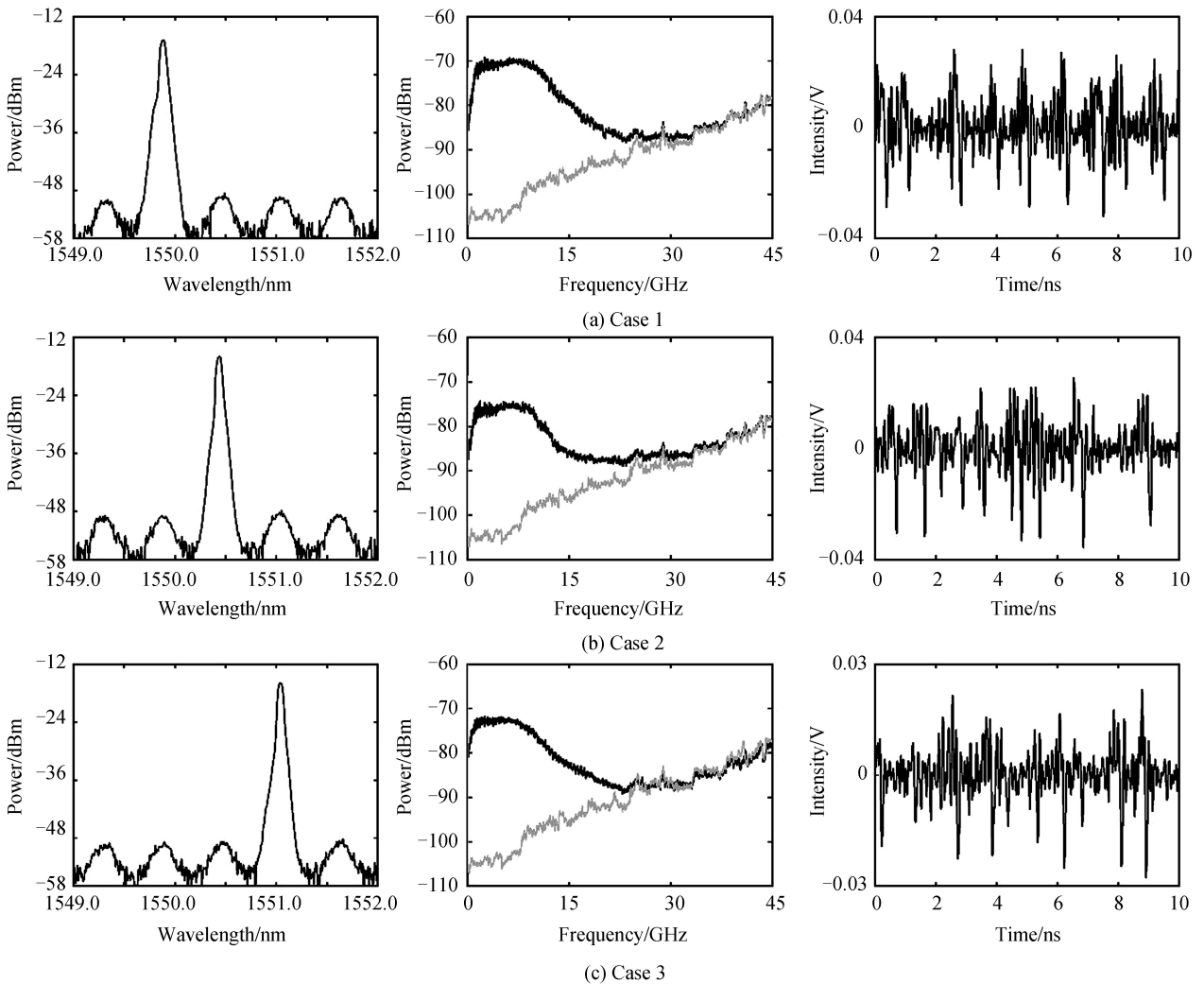


图 3 三种情形下, M-WRC-FPLD 输出混沌信号的光谱、功率谱及时间序列

Fig.3 Optical spectra, power spectra and corresponding time series of M-WRC-FPLD outputs under three different cases



## 2.2 给定注入强度下频率失谐对混沌光注入下 S-WRC-FPLD 输出混沌信号带宽的影响

以 M-WRC-FPLD 工作在 Case 3 为例,分析注入强度一定时频率失谐对 S-WRC-FPLD 输出混沌信号带宽的影响.此时, M-WRC-FPLD 注入到 S-WRC-FPLD 的混沌光的中心波长位于 1 551.040 nm、有效带宽为 9.50 GHz.图 4 给出了注入光的功率固定在  $\eta=432.64 \mu\text{W}$ ,而频率失谐  $\Delta f$  取不同值时 S-WRC-FPLD 输出的光谱(第一列)、功率谱(第二列)和时序(第三列).当频率失谐  $\Delta f=20.50 \text{ GHz}$ (如图 4(a)所示)时, S-WRC-FPLD 中除与 M-WRC-FPLD 激射模式对应的纵模外,其它模式均被抑制(模式抑制比为 19 dB),此时 S-WRC-FPLD 输出的混沌信号带宽达到了 29.19 GHz,比注入混沌信号的带宽(9.50 GHz)增强了 3 倍以上.混沌带宽得到增强的原因是因为注入混沌光与 S-MRC-FPLD 激光场之间的拍频导致高频部分被加强<sup>[13,15,20]</sup>.当  $\Delta f=0.5 \text{ GHz}$  时(如图 4(b)所示),光谱中除了再生的注入光外,其他的模式同样几乎被抑制,其模式抑制比达 19 dB.此时,激光器输出混沌信号的高频部分的功率与图 4(a)中的第二列的情况相比有一定下降,其相应的带宽约为 23.36 GHz.当  $\Delta f=-7.5 \text{ GHz}$  时(如图 4(c)所示),从光谱上可以看出注入的混沌信号和 S-WRC-FPLD 输出混沌信号几乎重合,此时 S-WRC-FPLD 被注入锁定.从功率谱上可以看出 S-WRC-FPLD 输出混沌信号的高频部分功率进一步下降,其相应的带宽降低至 17.60 GHz.当  $\Delta f=-$

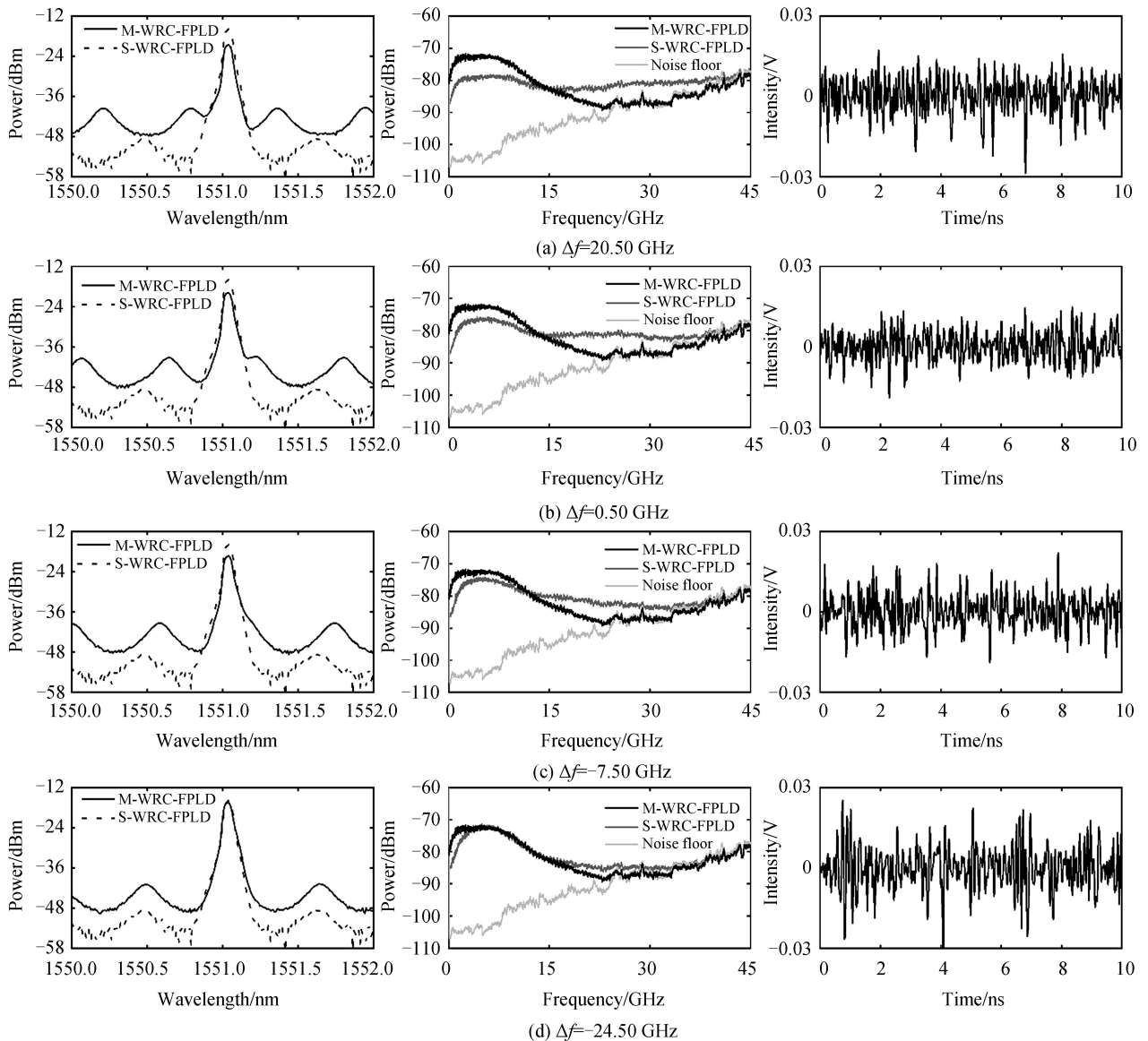


图 4 在工作于 Case 3 的 M-WRC-FPLD 所输出混沌信号光注入下,注入功率  $\eta=432.64 \mu\text{W}$  时 S-WRC-FPLD 输出的光谱、功率谱及时序

Fig.4 Optical spectra, power spectra and time series of the S-WRC-FPLD subject to optical injection from M-WRC-FPLD operating at Case 3 with  $\eta=432.64 \mu\text{W}$

-24.5 GHz时(如图 4(d)所示),从光谱上可以看出混沌注入信号与 S-WRC-FPLD 输出的混沌信号完全重合.此时这两个混沌信号对应的功率谱也几乎重合,这表明 S-WRC-FPLD 处于注入锁定状态,其相应的混沌信号带宽进一步降低为 10.03 GHz.

另外,对工作于 Case 1 和 Case 2 的 M-WRC-FPLD 输出的混沌光作为注入光的情形进行研究.图 5 给出了 S-WRC-FPLD 在如图 3 所示的三个不同情形下输出的混沌信号带宽随频率失谐  $\Delta f$  的变化曲线.需要说明的是,对于 M-WRC-FPLD 工作于 Case 1 和 Case 2,  $\eta$  分别选取 432.64  $\mu\text{W}$  以及 197.21  $\mu\text{W}$ .从图中可以看出,S-WRC-FPLD 分别在三个中心波长不同的混沌信号注入下,其对应输出混沌信号的带宽随失谐频率的变化呈现相似的变化规律.当频率失谐处于(-24.5 GHz~ -7.5 GHz)范围内,采用三种具有不同中心波长的混沌信号作为注入光,S-WRC-FPLD 均呈现注入锁定的状态,此时输出的混沌信号带宽与注入混沌信号带宽相比略有增长,但增长幅度较小.随着频率失谐  $\Delta f$  从 -7.5 GHz变化到 25.0 GHz,三种情形下 S-WRC-FPLD 输出混沌信号的带宽均呈现先逐渐增加,达到最大值后再逐渐减小的趋势.对于频率失谐量数值相同情况下,正频率失谐时 S-WRC-FPLD 输出混沌信号带宽大于负失谐所对应的混沌信号带宽,这是由于在负失谐条件下注入锁定效应更明显,从而导致其混沌信号带宽增强效果相对较弱.失谐量数值对三种不同的情形,带宽的最大值以及达到最大值所需的频率失谐略微有所不同.因此,在注入强度一定的情况下,可通过选择频率失谐以调控所产生的混沌信号的带宽.

### 2.3 给定频率失谐下注入功率对混沌光注入下 S-WRC-FPLD 输出混沌信号带宽的影响

讨论在给定的频率失谐条件下,注入强度变化对所产生的混沌信号带宽的影响,相应结果如图 6 所示.对于第一种情形(Case 1),以  $\Delta f = 2.5$  GHz 为例,所得结果如图 6(a)所示.从图中可以看出:混沌带宽随着注入功率的增加而快速增加,当注入功率增加到  $\eta = 0.76$  mW 时,其混沌带宽达到极大值 31.06 GHz.继续增加注入功率,混沌带宽总体呈现下降趋势,并伴随着波动.混沌带宽呈现如图所示的变化规律的原因如下:随着注入功率的增加,光注入导致 S-WRC-FPLD 红移效应增强,注入混沌光与 S-WRC-FPLD 中的激光光场的拍频引起的能量增强的频率区域发生变化,其与 S-WRC-FPLD 的弛豫振荡共同作用导致 S-WRC-FPLD 输出混沌带宽呈现如图所示的变化趋势.对于第二种注入情形(Case 2),选择一个较大的正失谐  $\Delta f = 12.5$  GHz 进行讨论,所得结果如图 6(b)所示.此时,随着注入功率增加,S-WRC-FPLD 输出混沌信号的带宽

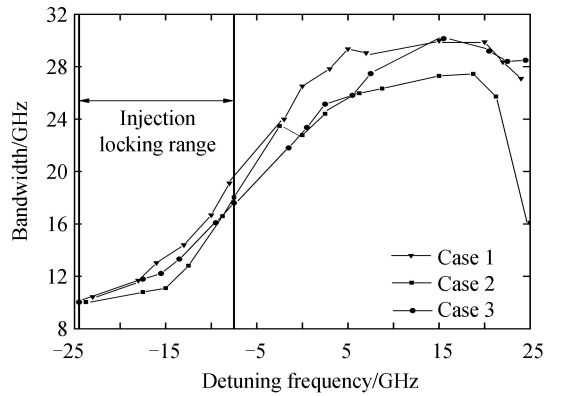


图 5 三种注入情形下,S-WRC-FPLD 输出混沌信号的带宽随频率失谐  $\Delta f$  的变化曲线

Fig.5 Chaotic bandwidths of S-WRC-FPLD as a function of  $\Delta f$  under three chaos signal injection cases

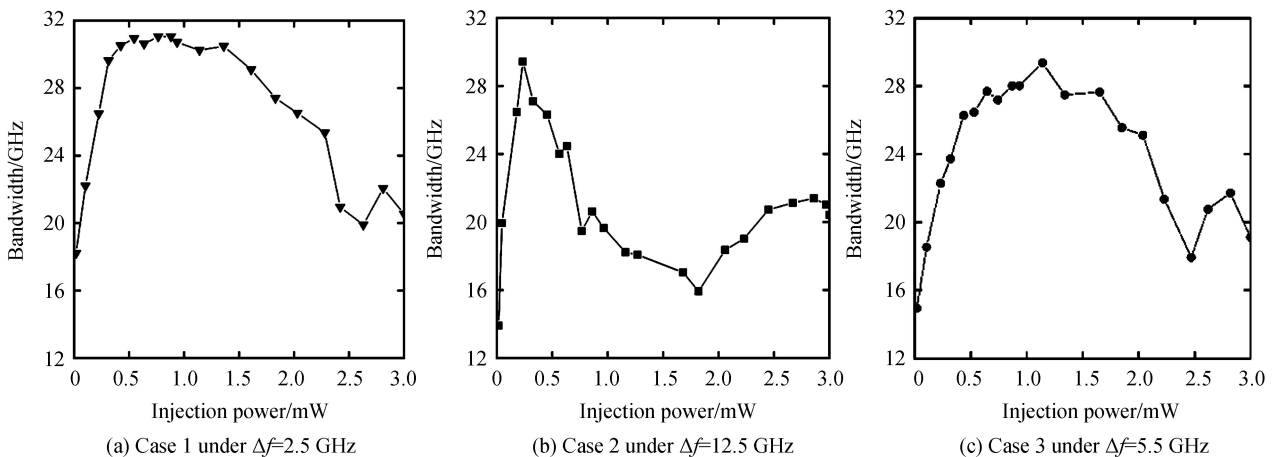


图 6 三种注入情形下,S-WRC-FPLD 输出混沌信号的带宽随注入功率  $\eta$  的变化曲线

Fig.6 Chaotic bandwidths of S-WRC-FPLD as a function of  $\eta$  under three chaos signal injection cases

快速增长,在  $\eta=0.24$  mW 时达到其极大值 29.44 GHz.继续增加注入功率,S-WRC-FPLD 输出混沌信号的带宽呈现快速下降的趋势,同时也伴随着波动.对于第三种注入情形(Case 3),选取失谐频率  $\Delta f=5.5$  GHz 时进行研究,结果如图 6(c)所示.此时,S-WRC-FPLD 输出混沌信号的带宽随注入功率增加呈现出与 Case 1 时类似的变化规律,即其带宽随着注入功率的增加先增加到一个最大值后再缓慢降低,并伴随波动.

### 3 结论

利用 FBG 反馈作用下 M-WRC-FPLD 输出的中心波长可调谐的混沌信号单向注入到 S-WRC-FPLD 获取中心波长可调谐的带宽可控混沌信号.实验研究结果表明:通过调节 FBG 反射的中心波长并选择合适的反馈强度,可使 M-WRC-FPLD 激射在不同的纵模并输出中心波长可调谐的混沌信号.将 M-WRC-FPLD 分别激射在三个连续纵模所输出的混沌信号作为注入光,单向注入到 S-WRC-FPLD 中,可使 S-WRC-FPLD 输出的中心波长与注入混沌光的中心波长基本一致.在注入光功率固定的条件下,失谐频率从  $-25.0$  GHz 增加到  $25.0$  GHz,S-WRC-FPLD 输出的混沌信号带宽呈现先增大后减小的趋势;而对于失谐频率固定,随着注入功率的增加,S-WRC-FPLD 输出混沌信号带宽经过一个快速增长达到极大值后,总体呈现下降趋势,在下降过程中伴随着波动.因此,通过选择合适的反馈和注入参量,可得到中心波长在 FBG 波长范围内可调谐、带宽在  $10.0\sim 30.0$  GHz 范围内可调的混沌信号.

### 参考文献

- [1] PECORA L M, CARROLL T L. Synchronizing in chaotic systems[J]. *Physical Review Letters*, 1990, **64**(8): 821-824.
- [2] VANWIGGEREN G D, ROY R. Communication with chaotic lasers[J]. *Science*, 1998, **279**(5354): 1198-1200.
- [3] KUSUMOTO K, OHTSUBO J. 1.5 GHz message transmission based on synchronization of chaos in semiconductor lasers[J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(12): 989-991.
- [4] XIA Guang-qiong, WU Zheng-mao, WU Jia-gui. Theory and simulation of dual-channel optical chaotic communication system[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(9): 3445-3453.
- [5] HU Ju-ju, ZHOU Xiao-yong, MA Jun-shan. Multiplexed chaos synchronization communication system with nonlinear delayed optoelectronic feedbacks[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 55-60.
- 胡菊菊, 周小勇, 马军山. 非线性光电延时反馈混沌同步复用通信系统研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(1): 55-60.
- [6] ZHAO Qing-chun, WANG Yun-cai, WANG An-bang. Eavesdropping in chaotic optical communication using the feedback length of an external-cavity laser as a key[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(18): 3515-3520.
- [7] WU Jia-gui, WU Zheng-mao, TANG Xi, et al. Experimental demonstration of LD-based bidirectional fiber-optic chaos communication[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(6): 587-590.
- [8] LIU Hui-jie, FENG Jiu-chao, REN Bin. Structure of fiber channel in open-loop all-optical chaotic communication system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11): 1267-1273.
- 刘慧杰, 冯久超, 任斌. 开环全光混沌通信系统中的光纤信道结构[J]. *光子学报*, 2012, **41**(11): 1267-1273.
- [9] XUE Chen-peng, JIANG Ning, LV Yun-xin, et al. Security-enhanced chaos communication with time-delay signature suppression and phase encryption[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(16): 3690-3693.
- [10] ARGYRIS A, SYVRIDIS D, LARGER L, et al. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links[J]. *Nature*, 2005, **438**(7066): 343-346.
- [11] LAVROV R, JACQUOT M, LARGER L. Nonlocal nonlinear electro-optic phase dynamics demonstrating 10 Gb/s chaos communications[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, **46**(10): 1430-1435.
- [12] WANG An-bang, WANG Yun-cai, HE Hu-cheng. Enhancing the bandwidth of the optical chaotic signal generated by a semiconductor laser with optical feedback[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(19): 1633-1635.
- [13] WANG An-bang, WANG Yun-cai, WANG Juan-fen. Route to broadband chaos in a chaotic laser diode subject to optical injection[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(8): 1144-1146.
- [14] HONG Yan-hua, SPENCER P S, SHORE K A. Enhancement of chaotic signal bandwidth in vertical-cavity surface-emitting lasers with optical injection[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012, **29**(3): 415-419.
- [15] UCHIDA A, HEIL T, LIU Yun, et al. High-frequency broad-band signal generation using a semiconductor laser with a chaotic optical injection[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, **39**(11): 1462-1467.
- [16] SOMEYA H, OOWADA I, OKUMURA H, et al. Synchronization of bandwidth-enhanced chaos in semiconductor lasers with optical feedback and injection[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(22): 19536-19543.
- [17] LI Nian-qiang, PAN Wei, XIANG Shui-ying, et al. Loss of time delay signature in broadband cascade-coupled semiconductor lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(23): 2187-2190.
- [18] HONG Yan-hua, SPENCER P S, SHORE K A. Flat broadband chaos in vertical-cavity surface-emitting lasers subject to chaotic optical injection [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, **48**(12): 1536-1541.

- [19] CHEN Jian-jun, WU Zheng-mao, TANG X, *et al.* Generation of polarization-resolved wideband unpredictability-enhanced chaotic signals based on vertical-cavity surface-emitting lasers subject to chaotic optical injection[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(6): 7173-7183.
- [20] SU Bin-bin, CHEN Jian-jun, WU Zheng-mao, *et al.* Performances of time-delay signature and bandwidth of the chaos generated by a vertical-cavity surface-emitting laser under chaotic optical injection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, **66**(24): 244206.  
苏斌斌, 陈建军, 吴正茂, 等. 混沌光注入垂直腔面发射激光器混沌输出的时延和带宽特性[J]. *物理学报*, 2017, **66**(24): 244206.
- [21] DENG Tao, XIA Guang-qiong, WU Zheng-mao. Broadband chaos synchronization and communication based on mutually coupled VCSELs subject to a bandwidth-enhanced chaotic signal injection[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2014, **76**(1): 399-407.
- [22] KE Jun-xiang, YI LI-lin, XIA Guang-qiong, *et al.* Chaotic optical communications over 100-km fiber transmission at 30 Gb/s bit rate[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(6): 1323-1326.
- [23] PAUL J, SIVAPRAKASAM S, SHORE K A. Dual-channel chaotic optical communications using external-cavity semiconductor lasers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2004, **21**(3): 514-521.
- [24] MATSUURA T, UCHIDA A, YOSHIMORI S. Chaotic wavelength division multiplexing for optical communication [J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(23): 2731-2733.
- [25] ZHANG Jian-zhong, WANG An-bang, WANG Juan-fen, *et al.* Wavelength division multiplexing of chaotic secure and fiber-optic communications[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(8): 6357-6367.
- [26] JIANG Ning, XUE Chen-peng, LV Yun-xin, *et al.* Physically enhanced secure wavelength division multiplexing chaos communication using multimode semiconductor lasers[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, **86**(3): 1937-1949.
- [27] ARGYRIS A, GRIVAS E, BOGRIS A, *et al.* Transmission effects in wavelength division multiplexed chaotic optical communication systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(21): 3107-3114.
- [28] LIN Gong-ru, WANG Hai-lin, LIN Gong-cheng, *et al.* Comparison on injection-locked Fabry-Perot laser diode with front-facet reflectivity of 1% and 30% for optical data transmission in WDM-PON system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(14): 2779-2785.
- [29] LIN Gong-ru, CHENG Tzu-kang, LIN Yi-hung, *et al.* Suppressing chirp and power penalty of channelized ASE injection-locked mode-number tunable weak-resonant-cavity FPLD transmitter [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, **45**(9): 1106-1113.
- [30] ZHONG Zhu-qiang, LIN Gong-ru, WU Zheng-mao, *et al.* Tunable broadband chaotic signal synthesis from a WRC-FPLD subject to filtered feedback[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, **29**(17): 1506-1509.
- [31] LIN Fan-yi, CHAO Yuh-kwei, WU Tsung-chieh. Effective bandwidths of broadband chaotic signals[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, **48**(8): 1010-1014.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61475127, 61575163, 61775184, 61875167), the Natural Science Foundation of Chongqing City (No. CSTC2016jcyjA0082) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (No. XDJK2017B012)

引用格式: LIU Lin-jie, DENG Tao, WU Zheng-mao, *et al.* Generation of Tunable Chaotic Signal with Controllable Bandwidth Based on Weak-resonant-cavity Fabry-Perot Laser Diodes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(10): 1014003

刘林杰, 邓涛, 吴正茂, 等. 基于弱谐振腔法布里-珀罗激光器获取中心波长可调谐的带宽可控混沌信号[J]. *光子学报*, 2018, **47**(10): 1014003