

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.07.020

郑秋兰, 高子叶, 唐曦, 等. 基于非对称互注入 WRC-FPLDs 的波长可调谐的混沌同步 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(7): 229-236.

基于非对称互注入 WRC-FPLDs 的 波长可调谐的混沌同步

郑秋兰, 高子叶, 唐曦, 谢瑛珂, 任一心,
杜周南, 夏光琼, 吴正茂, 邓涛

西南大学 物理科学与技术学院/微纳结构光电子学重庆市重点实验室, 重庆 400715

摘要: 提出了基于两个非对称互注入弱谐振腔法布里-珀罗激光器 (weak-resonant-cavity Fabry-Perot laser diodes, WRC-FPLDs) 的波长可调谐的混沌同步系统, 实验研究了系统的同步性能. 结果表明, 在一定的非对称注入强度和频率失谐条件下, 两个互注入 WRC-FPLDs 的对应模式之间能实现高质量的超前-滞后混沌同步, 最大互相关系数 $C_{\max}$ 可达 0.90 以上. 增加两个互注入激光器之间的非对称注入程度并采用适当的负频率失谐有助于提升系统的同步性能.

关键词: 弱谐振腔法布里-珀罗激光器; 非对称互注入;
波长可调谐; 混沌同步

中图分类号: TN248.4; TN918.91

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2023)07-0229-08

Wavelength-Tunable Chaos Synchronization Based on Asymmetric Mutually Coupled WRC-FPLDs

ZHENG Qiulan, GAO Ziyue, TANG Xi, XIE Yingke, REN Yixin,
DU Zhounan, XIA Guangqiong, WU Zhengmao, DENG Tao

School of Physical Science and Technology, Southwest University / Chongqing Key Laboratory of
Micro & Nano Structure Optoelectronics, Chongqing 400715, China

Abstract: In this paper, a wavelength-tunable chaos synchronization system based on two asymmetric mu-

收稿日期: 2022-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(61875167); 重庆市教委科学技术研究重点项目(KJZD-K202100204).

作者简介: 郑秋兰, 硕士研究生, 主要从事混沌保密光通信的研究.

通信作者: 邓涛, 教授, 博士研究生导师.

tually coupled weak-resonant-cavity Fabry-Perot Laser Diodes (WRC-FPLDs) is presented, and the chaos synchronization characteristics are experimentally investigated. The results show that under proper asymmetrical injection strength and frequency detuning, stable leader-laggard chaos synchronization with the maximal correlation coefficient over 0.90 between two corresponding modes in two mutually coupled WRC-FPLDs can be achieved. In addition, the chaos synchronization quality can be improved by enlarging the asymmetrical injection extent between two mutually coupled lasers and adopting a suitable negative detuning frequency.

Key words: WRC-FPLDs; asymmetrically mutual coupling; wavelength-tunable; chaos synchronization

自 2005 年基于希腊雅典城域网首次实现混沌保密通信现场实验以来,混沌保密通信引起了人们越来越多的关注^[1]. 迄今为止,不同的混沌保密通信架构已经被提出并证实^[2-4],单向单信道传输速率可以达到 30 Gb/s,传输距离可达 100 km 以上. 然而,人们对混沌保密光通信的研究大多局限于单模半导体激光器(semiconductor lasers, SLs)的单信道通信,这很难满足未来混沌保密光通信在通信速率和通信容量方面的高速发展需求. 因此,研究者提出了基于波分复用技术(wavelength division multiplexing, WDM)的多信道混沌保密光通信系统^[5-12]. 例如,Paul 等^[5]利用两个外腔反馈单模 SLs 分别作为发射端提供双信道的混沌载波,信息经光纤传输后到达接收端进行解密,实现了双信道的混沌保密通信. Argyris 等^[7]利用由分布式反馈激光器和波导外腔构成的一对光子集成电路,实现了 1.25 Gb/s 加密数据序列的密集波分复用传输. Jiang 等^[8]提出了一种基于多对 SLs 的波分复用无源光网络(WDM-PON)方案,理论实现了多信道的混沌保密通信. 上述研究从实验和理论两方面证明了基于 WDM 技术的多信道混沌保密光通信的可行性,从而为未来高速、大容量混沌保密通信网络的构建和应用提供了一种可行的候选方案.

WDM 混沌保密通信系统构建的关键环节之一是寻求大范围波长可调的混沌载波源. 在适当的光反馈、光电反馈或光注入等外部扰动作用下,SLs 容易被驱动到混沌工作态,且其输出的混沌信号较为复杂,因而已经成为混沌保密通信中常用的混沌光源. 与传统的单模 SLs 相比,法布里-珀罗激光器(Fabry-Perot laser diodes, FPLDs)可同时输出多个模式,从而为多信道混沌保密通信系统的构建提供了可能. 2004 年, Buldu 等^[13]从理论上研究了基于两个单向耦合 FPLDs 的多信道通信系统的混沌同步性能和通信性能. 2014 年,操良平等^[14]提出了基于光反馈多模 SLs 的多信道单向混沌通信系统,数值研究了系统的同步特性及通信性能. 2016 年, Jiang 等^[15]理论证实了基于多模激光器的安全性增强的 WDM 混沌保密光通信. 特别地, Lin 等^[16]在传统 FPLDs 的基础上研发了弱谐振腔法布里-珀罗激光二极管(WRC-FPLDs). 与传统 FPLDs 相比, WRC-FPLDs 具有有更长的腔长和更低的前端面反射率,因而其模式间隔更小,在一定波长范围内可能存在更多的模式. 基于以上优点, WRC-FPLDs 有望成为构建 WDM 混沌保密光通信系统的理想光源. Zhong 等^[17]进一步证实了基于滤波反馈 WRC-FPLDs 可以产生波长大范围可调节的宽带混沌信号以及基于两个单向耦合 WRC-FPLDs 可实现波长可调谐的混沌保密通信^[18].

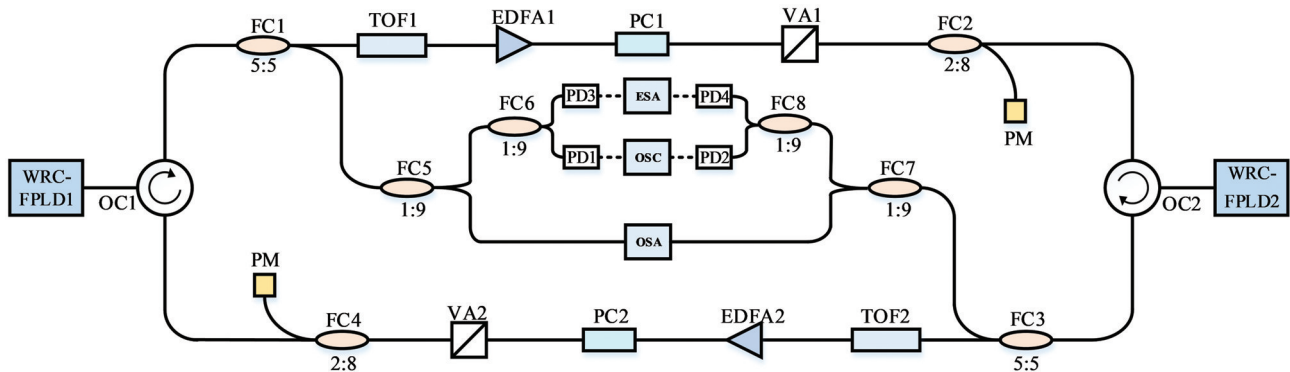
众所周知,实现混沌保密通信的必要前提是发射端和接收端激光器之间实现高质量的混沌同步. 目前大多数混沌同步的研究主要集中在单信道的单向耦合(unidirectional coupling, UC)结构^[3-4, 19]. 在这种结构中,信息被加载到发射端的混沌载波上,基于两激光器的混沌同步,在接收端利用混沌滤波效应(chaos pass filtering effect, CPF)可实现信息的有效提取^[20-21]. 为进一步提高系统的通信容量,基于互耦激光器结构的混沌同步实现双向保密通信受到了广泛关注^[22-24]. 在对称的互耦合结构中,由于 SLs 之间的噪声、频率失谐及其他内部参量等因素会导致系统自发地出现对称破缺现象,导致 SLs 之间的超前-滞后角色发生相应的改变^[25-26],因而难以获得适用于通信的稳定的混沌同步. 为解决混沌同步稳定性的问题,人们在对称的互耦合结构基础上通过增加反馈环获得了稳定的混沌同步^[27-28]. Zhang 等^[29]提出了

一种极度不对称的互耦合混沌保密通信系统, 该系统没有引入额外的反馈环, 而是通过极度非对称导致的注入锁定效应实现了稳定的混沌同步和双向通信. Deng 等^[22]基于非对称偏置电流下的互耦合激光器实现了高质量的超前-滞后混沌同步. 由此可见, 非对称互耦合结构的引入为高质量混沌同步的实现提供了一种可行的方式.

本文提出了一种基于两个非对称互注入 WRC-FPLDs 实现波长可调谐的混沌同步方案. 通过调节互注入光路中可调光滤波器的中心波长和可调衰减器, 可以实现混沌载波波长的自由切换和非对称注入的调整. 两个 WRC-FPLDs 之间由于较强的非对称光注入导致注入锁定, 从而实现波长可调谐的混沌同步. 此外, 还讨论了非对称注入程度和频率失谐对两激光器对应模式之间混沌同步性能的影响.

1 实验装置

图 1 为基于非对称互注入 WRC-FPLDs 的波长可调谐混沌同步实验装置图, WRC-FPLDs 分别由两个高精度、超低噪声的激光器控制器(LC, ILX-Lightwave LDC-3724C)驱动. 在实验过程中, 非对称注入通过分别调节两条路径的注入强度来实现. WRC-FPLD1 的输出光经过一个光环形器(OC1)后被 50 : 50 的光纤耦合器(FC1)分为两部分. 其中一部分输出光依次经过可调光滤波器(TOF1, AOS, range: 1 544.00 nm~1 556.00 nm, 3 dB bandwidth: 0.28 nm)、掺铒光纤放大器(EDFA1)、偏振控制器(PC1)和可调衰减器(VA1)后, 再次被 20 : 80 的光纤耦合器(FC2)分成两部分, 其中 80 % 的输出通过 OC2 的端口 1 注入 WRC-FPLD2, 20 % 的输出进入功率计(PM, JW3216C)进行光功率检测. 实验过程中 TOF1 用于调节 WRC-FPLD1 的中心波长, PC1 和 VA1 分别用于调节偏振态和注入强度. 从 FC1 输出的另一部分光通过 10 : 90 的光纤耦合器(FC5)进入测试分析系统. 其中一部分输出光进入光谱分析仪(Aragon Photonics BOSA lite+)以实现光谱的探测, 另一部分输出光通过两个光电探测器(PD1, New Focus 1 544-B, 12GHz bandwidth; PD3, U2T-XPDV2120R, 50 GHz bandwidth)后分别进入数字示波器(OSC, Agilent X91604A, 40 GSa/s, 16 GHz bandwidth)和频谱分析仪(ESA, R&S FSW, 67 GHz bandwidth)以分析混沌信号的时间序列和相应的功率谱. WRC-FPLD2 输出光的传输路径与 WRC-FPLD1 类似, 且 PD1 和 PD2, PD3 和 PD4 的型号一致.



WRC-FPLD 为弱谐振腔法布里-珀罗激光二极管; OC 为光学环形器; FC 为光纤耦合器; TOF 为可调光滤波器; EDFA 为掺铒光纤放大器; PC 为偏振控制器; VA 为可调衰减器; PM 为功率计; PD 为光电探测器; OSC 为数字示波器; ESA 为频谱分析仪; OSA 为光谱分析仪.

图 1 基于非对称互注入 WRC-FPLDs 的波长可调谐混沌同步实验装置图

2 实验结果与讨论

图 2 为 WRC-FPLD1 和 WRC-FPLD2 自由运行时的光谱, 两个 WRC-FPLDs 的偏置电流分别固定在 $I_1 = 55.00 \text{ mA}$, $I_2 = 35.00 \text{ mA}$, 温度分别设定为 $T_1 = 21.00 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $T_2 = 19.50 \text{ }^\circ\text{C}$. 从图 2 可以看出, 两个

激光器在自由运行状态下可在 1 535~1 565 nm 的范围内输出多达 50 个模式, 模式间隔约为 0.57 nm. 由于两激光器的纵模间隔几乎相同, 因此两激光器对应纵模之间的频率失谐被定义为 $\Delta f=f_1-f_2$, 其中 f_1 和 f_2 分别为 WRC-FPLD1 和 WRC-FPLD2 对应模式的频率. 耦合强度 κ_{12} 和 κ_{21} 分别定义为 WRC-FPLD1 注入 WRC-FPLD2 的光功率与 WRC-FPLD2 自由运行时的输出功率之比, 以及 WRC-FPLD2 注入 WRC-FPLD1 的光功率与 WRC-FPLD1 自由运行时的输出功率之比. 在整个实验中, 通过固定 WRC-FPLD2 的温度和调节 WRC-FPLD1 的温度, 可以调节频率失谐 Δf . 考虑到各个模式的情况基本一致, 为了简便, 本文仅仅考虑了两个模式的情况.

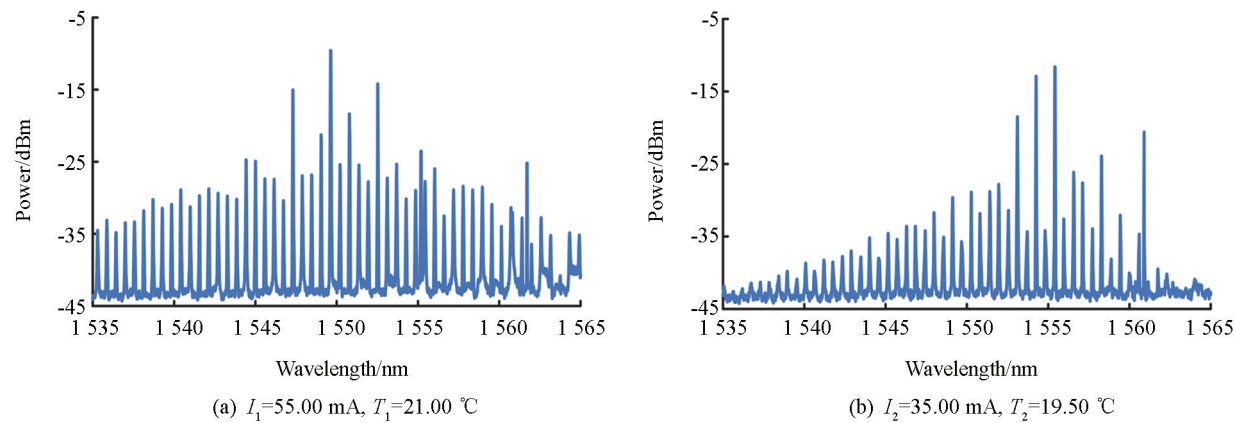
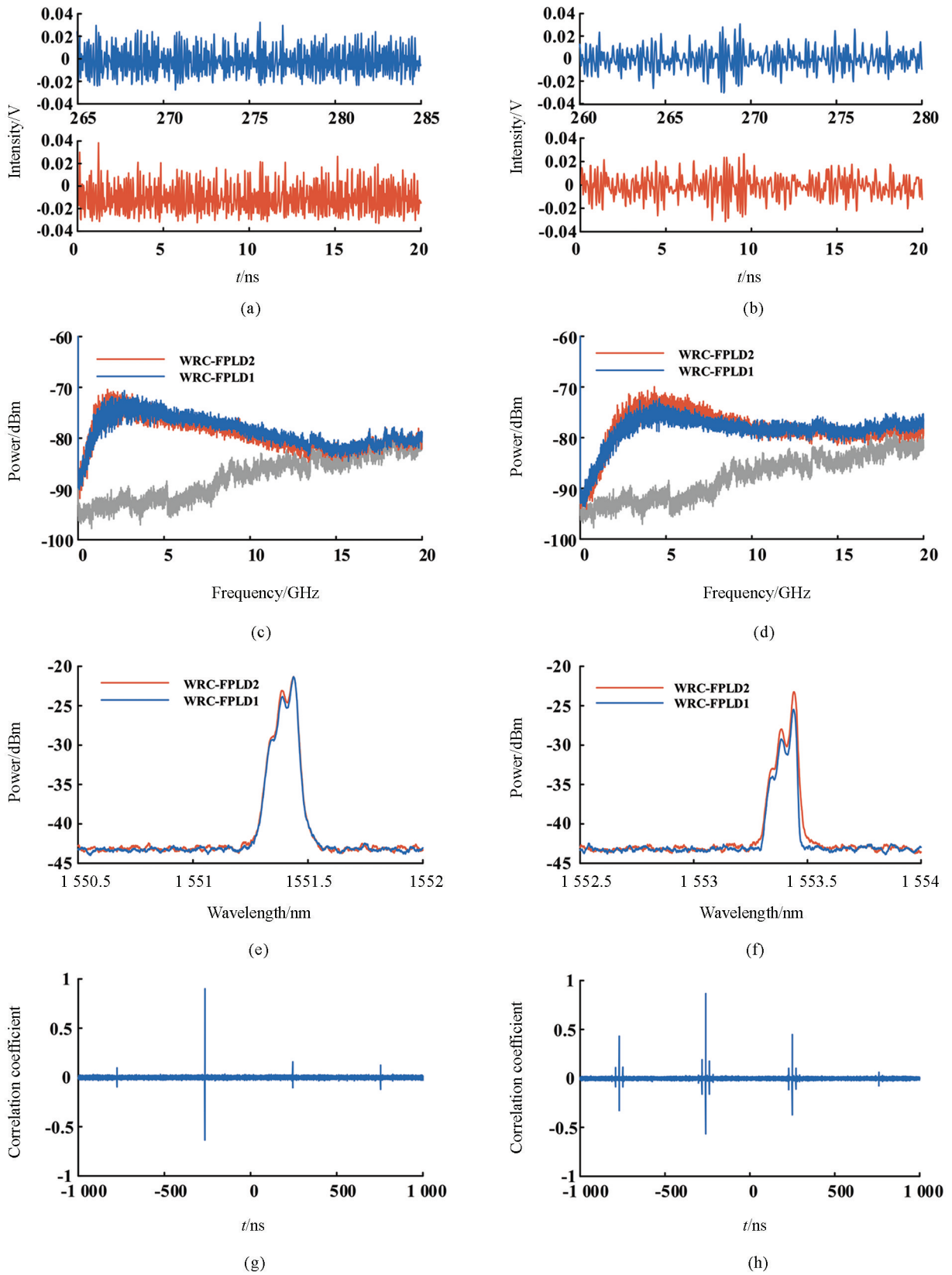


图 2 WRC-FPLD1 和 WRC-FPLD2 自由运行时的光谱

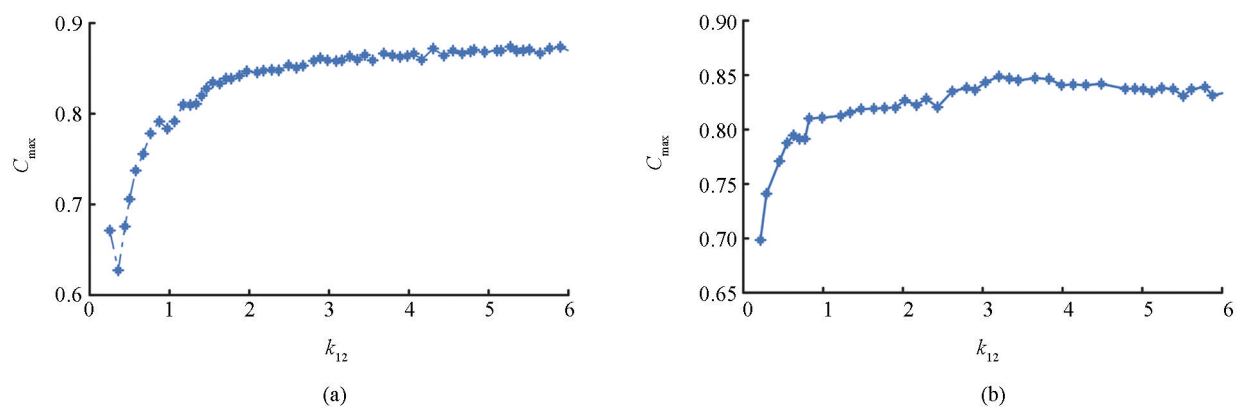
图 3 为 WRC-FPLD1 和 WRC-FPLD2 输出的两个模式所对应的时间序列(图 3a,3b)、功率谱(图 3c, 3d)、光谱(图 3e, 3f)和互相关系数(图 3g, 3h). 图 3a,3c,3e,3g 分别对应 $\lambda=1\ 551.416\ 8\ \text{nm}$, $\kappa_{12}=2.032$, $\kappa_{21}=0.022$, $\Delta f=-5\ \text{GHz}$, 图 3b,3d,3f,3h 分别对应 $\lambda=1\ 553.453\ 0\ \text{nm}$, $\kappa_{12}=3.732$, $\kappa_{21}=0.023$, $\Delta f=-5\ \text{GHz}$. 从图 3a,3c,3e 和图 3b,3d,3f 可以看出, 两个激光器对应模式均工作在混沌态, 其光谱展宽, 功率谱变得平滑. 从图 3g 和图 3h 可以看出, 通过调节非对称注入强度和频率失谐, WRC-FPLD1 的输出滞后于 WRC-FPLD2 的输出, 两个模式间实现了高质量超前-滞后混沌同步, 最大的同步系数均位于 $-260\ \text{ns}$ 附近(对应两个激光器之间的距离)且最大互相关系数 $C_{\max}$ 分别为 0.90 和 0.87. 在本实验中, 由于 κ_{12} 远大于 κ_{21} , WRC-FPLD1 的输入光驱动 WRC-FPLD2 工作在混沌态并实现了注入锁定, 从而使系统获得了高质量的超前-滞后混沌同步. 需要指出的是, 两个激光器超前或滞后的角色可以互换, 这本质上取决于互注入双方各自输出功率与被注入功率的关系, 两个激光器因此可分别工作于被注入锁定的状态.

图 4 为无频率失谐情况下, 两个激光器相应模式间最大相关系数 $C_{\max}$ 随耦合强度 κ_{12} 的变化曲线, 其中耦合强度 κ_{21} 分别固定为 0.022 和 0.023. 从图中可以看出, 两个模式的最大互相关系数曲线呈现出了相似的变化趋势. 随着 κ_{12} 的增加, $C_{\max}$ 迅速增大并最终保持在一个较高水平. 这一现象可以解释为: 当 κ_{12} 较小时, 两个激光器的角色相当, 在互注入作用下无法达到较好的同步. 随着 κ_{12} 的增加, WRC-FPLD1 的主导地位越来越明显, 在非对称互注入作用下 WRC-FPLD2 输出逐渐趋向于与 WRC-FPLD1 的输出一致. 当 κ_{12} 增大到一定程度后, WRC-FPLD1 在非对称互注入中扮演了主导角色, WRC-FPLD2 被 WRC-FPLD1 注入锁定, 因此两个激光器相应的模式之间可以达到高质量的混沌同步. 随着 κ_{12} 的进一步增大, 极度非对称互注入结构使激光器之间的注入锁定效应得到进一步加强, 混沌同步质量被稳定在一个较高的水平. 由图 3 和图 4 可知, 在一定的频率失谐下, 两个互注入激光器间非对称程度的增加有利于系统实现高质量混沌同步.



a, b 对应时间序列; c, d 对应功率谱; e, f 对应光谱; g, h 对应互相关系数. a, c, e, g 分别对应 $\lambda = 1\,551.416\,8\,\text{nm}$, $\kappa_{12} = 2.032$, $\kappa_{21} = 0.022$, $\Delta f = -5\,\text{GHz}$; b, d, f, h 分别对应 $\lambda = 1\,553.453\,0\,\text{nm}$, $\kappa_{12} = 3.732$, $\kappa_{21} = 0.023$, $\Delta f = -5\,\text{GHz}$.

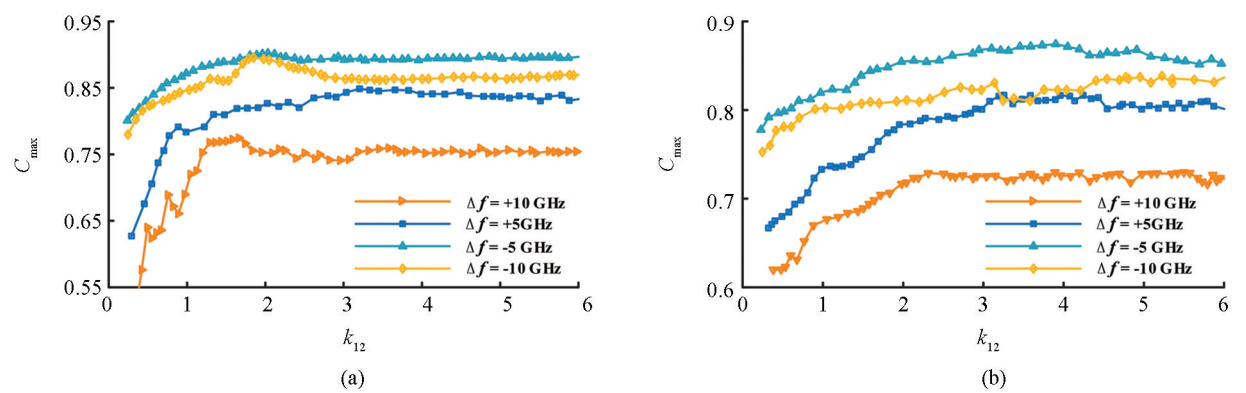
图 3 WRC-FPLD1 和 WRC-FPLD2 的输出



κ_{21} 分别固定在 0.022 和 0.023, 波长 λ 分别为 1 551.416 8 nm 和 1 553.453 0 nm.

图 4 两种模式的混沌信号 $C_{\max}$ 随 κ_{12} 变化的曲线

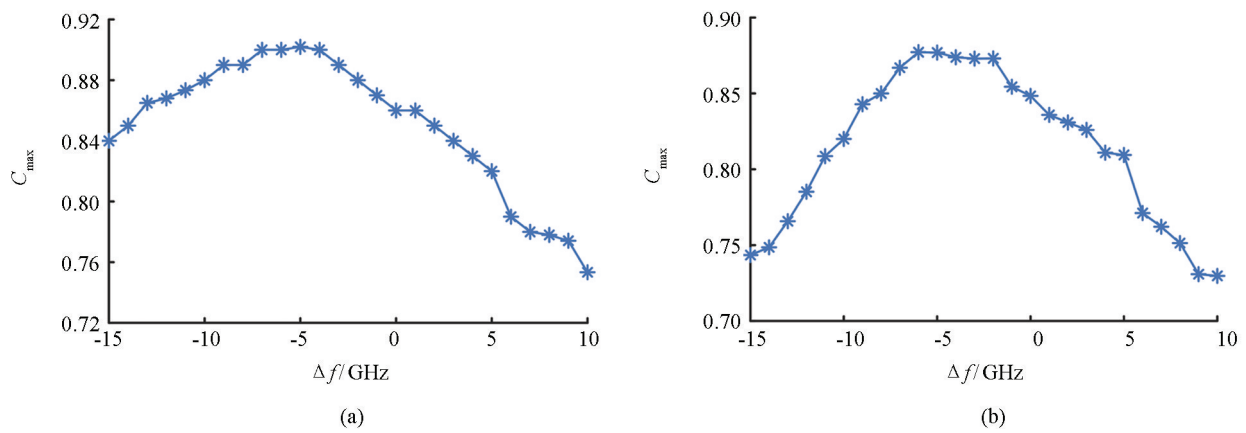
图 5 给出了不同频率失谐下 $C_{\max}$ 随 κ_{12} 的变化曲线. 从图 5 中可以看出, 与零失谐的情况相比, 在一定的频率失谐下, 两个模式的 $C_{\max}$ 随 κ_{12} 的变化整体上仍然呈现相似的变化趋势. 此外, 由于光注入导致的波长红移现象, 适当的负频率失谐有助于系统实现注入锁定, 从而提高系统的同步性能. 相反, 正频率失谐注入将进一步扩大两个激光器之间由于互注入引起的频率之差, 弱化注入锁定效应, 从而使同步性能恶化. 因此, 在我们的实验条件下, 相比于正频率失谐, 适当的负频率失谐有助于获得更高质量的混沌同步.



Δf 分别为 +5 GHz, +10 GHz, -5 GHz, -10 GHz, κ_{21} 分别为 0.022, 0.023.

图 5 两个对应模式输出的 $C_{\max}$ 随 κ_{12} 变化的曲线

图 6 给出了 $C_{\max}$ 随 Δf 变化的曲线, 其中 κ_{12} 分别为 2.032 和 3.732, κ_{21} 分别为 0.022 和 0.023. 从



(a) $\kappa_{12}=2.032$, $\kappa_{21}=0.022$, $\lambda=1\,551.416\,8\,\text{nm}$; (b) $\kappa_{12}=3.732$, $\kappa_{21}=0.023$, $\lambda=1\,553.453\,0\,\text{nm}$.

图 6 两种模式的混沌信号的 $C_{\max}$ 随 Δf 的变化

图 6 中可以看出, 与零失谐的情况相比, 正失谐的增加会降低系统的同步性能, 而适当的负失谐有助于提高系统的同步性能, 进一步增大负失谐同样会降低系统的同步性能, 这些结果与图 5 中的情况基本一致. 由此可见, 通过增加两个激光器注入的非对称程度和采用适当的负频率失谐将有助于系统获得高质量混沌同步.

3 结论

本文提出了基于两个非对称互注入 WRC-FPLDs 的波长可调谐的混沌同步系统, 实验研究了该系统的同步性能. 实验结果表明, 通过改变可调滤波器 TOF 的中心波长和两条路径的注入条件, WRC-FPLDs 输出的不同模式均可实现混沌输出. 通过分别控制两条路径的注入强度可以构建非对称互注入结构, 并实现超前-滞后混沌同步. 增强互注入的非对称程度并采用适当的负频率失谐可有效增强注入锁定效应, 从而提高系统混沌同步质量.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] WU J G, WU Z M, TANG X, et al. Experimental Demonstration of LD-Based Bidirectional Fiber-Optic Chaos Communication [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(6): 587-590.
- [3] WANG L S, GUO Y Y, WANG D M, et al. Experiment on 10-Gb/s Message Transmission Using an All-Optical Chaotic Secure Communication System [J]. *Optics Communications*, 2019, 453: 124350.
- [4] KE J X, YI L L, YANG Z, et al. 32Gb/s Chaotic Optical Communications by Deep-Learning-Based Chaos Synchronization [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(23): 5776-5779.
- [5] 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.
- [6] MATSUURA T, UCHIDA A, YOSHIMORI S. Chaotic Wavelength Division Multiplexing for Optical Communication [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(23): 2731-2733.
- [7] 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.
- [8] JIANG N, LIU D, ZHANG C F, et al. Modeling and Simulation of Chaos-Based Security-Enhanced WDM-PON [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(19): 1912-1915.
- [9] JIANG N, ZHANG C F, QIU K. Secure Passive Optical Network Based on Chaos Synchronization [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(21): 4501-4503.
- [10] 操良平, 董晓云, 梁兴连, 等. 基于双光电延迟反馈装置的双向混沌保密通信系统 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2013, 35(3): 161-167.
- [11] BAO X B, LI Q L, WU T, et al. WDM-Based Bidirectional Chaotic Communication for Semiconductor Lasers System with Time Delay Concealment [J]. *Optics Communications*, 2020, 472: 125868.
- [12] ABDULSATAR S M, SALEH M A, ABASS A K, et al. Bidirectional Hybrid Optical Communication System Based on Wavelength Division Multiplexing for Outdoor Applications [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2021, 53(10): 1-11.
- [13] BULDU J M, GARCIA-OJALVO J, TORRENT M C. Multimode Synchronization and Communication Using Unidirectionally Coupled Semiconductor Lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(6): 640-650.
- [14] 操良平, 董晓云, 王风, 等. 基于光反馈多模半导体激光器的多信道单向混沌同步与通信 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(3): 152-159.

- [15] JIANG N, XUE C P, LV Y X, et al. Physically Enhanced Secure Wavelength Division Multiplexing Chaos Communication Using Multimode Semiconductor Lasers [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 86(3): 1937-1949.
- [16] LIN G R, WANG H L, LIN G C, 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.
- [17] ZHONG Z Q, LIN G R, WU Z M, 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.
- [18] HU C X, XIA G Q, YUE D Z, et al. Experimental Demonstration of a Chaotic Communication System with a Switchable Chaotic Carrier Wavelength Based on Two Weak-Resonant-Cavity Fabry-Perot Laser Diodes [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(9): 2745.
- [19] JIANG N, ZHAO A K, LIU S Q, et al. Injection-Locking Chaos Synchronization and Communication in Closed-Loop Semiconductor Lasers Subject to Phase-Conjugate Feedback [J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 9477-9486.
- [20] PAUL J, LEE M W, SHORE K A. Effect of Chaos Pass Filtering on Message Decoding Quality Using Chaotic External-Cavity Laser Diodes [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(21): 2497-2499.
- [21] MURAKAMI A, SHORE K A. Chaos-Pass Filtering in Injection-Locked Semiconductor Lasers [J]. *Physical Review A*, 2005, 72(5): 053810.
- [22] DENG T, XIA G Q, WU Z M, et al. Chaos Synchronization in Mutually Coupled Semiconductor Lasers with Asymmetrical Bias Currents [J]. *Optics Express*, 2011, 19(9): 8762-8773.
- [23] OHARA S, KANNO K, UCHIDA A. Numerical Study on Dynamics-Dependent Synchronization in Mutually-Coupled Lasers with Asymmetric Feedback [J]. *Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE*, 2019, 10(1): 60-73.
- [24] WANG Z R, LI P, JIA Z W, et al. Synchronization of Polarization Chaos in Mutually Coupled Free-Running VCSELs [J]. *Optics Express*, 2021, 29(12): 17940-17950.
- [25] HEIL T, FISCHER I, ELSÄSSER W, et al. Chaos Synchronization and Spontaneous Symmetry-Breaking in Symmetrically Delay-Coupled Semiconductor Lasers [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(5): 795-798.
- [26] KANNO K, HIDA T, UCHIDA A, et al. Spontaneous Exchange of Leader-Laggard Relationship in Mutually Coupled Synchronized Semiconductor Lasers [J]. *Physical Review E*, 2017, 95(5): 052212.
- [27] GROSS N, KINZEL W, KANTER I, et al. Synchronization of Mutually Versus Unidirectionally Coupled Chaotic Semiconductor Lasers [J]. *Optics Communications*, 2006, 267(2): 464-468.
- [28] JIANG N, PAN W, LUO B, et al. Properties of Leader-Laggard Chaos Synchronization in Mutually Coupled External-Cavity Semiconductor Lasers [J]. *Physical Review E*, 2010, 81(6): 066217.
- [29] ZHANG W L, PAN W, LUO B, et al. Chaos Synchronization Communication Using Extremely Unsymmetrical Bidirectional Injections [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(3): 237.