

半导体激光器混沌通信研究进展

郑亮^{1,2}, 李秀玲^{3*}, 王瑛剑¹

(1. 海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430000; 2. 91954 部队, 湖南 永州 425000; 3. 忻州职业技术学院 计算机系, 山西 忻州 034000)

摘要:信息安全越来越受人们的重视,混沌光通信技术可以在物理层对光信号进行加密,因此成为了光纤通信的研究热点。简要介绍了混沌光通信的基本原理和关键技术,对近年来基于半导体激光器的混沌光通信研究所取得的进展进行了总结,并结合研究现状讨论了其未来发展方向。

关键词:半导体激光器;混沌光通信;光纤通信

中图分类号:TN929.1 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2020)01-0001-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.01.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress on chaotic communication of semiconductor lasers

ZHENG Liang^{1,2}, LI Xiuling^{3*}, WANG Yingjian¹

(1. School of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430000, China; 2. Unit 91954, Yongzhou Hunan 425000, China; 3. Computer Department of Xinzhou vocational and Technical College, Xinzhou Shanxi 034000, China)

Abstract: People pay more and more attention to information security. Chaotic optical communication technology can encrypt optical signal in physical layer, so it becomes a research hotspot of optical communication. This paper briefly introduces the basic principles and key technologies of chaotic optical communication, summarizes the progress made by chaotic optical communication research based on semiconductor laser in recent years, and discusses its future development direction based on the research status.

Key words: semiconductor lasers; chaotic communication; optical fiber communication

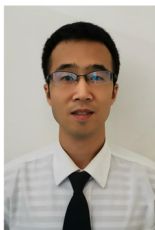
0 引言

光纤通信技术自从被提出以来,由于其高速率、大容量和低成本等特点,在各种数据传输系统中得到了广泛的应用。但是,目前光纤通信的信息加密手段主要是基于公共密钥和数学算法的应用层加密技术,在物理层的光纤链路中并未采取有效的防护措施,这为信息安全埋下了隐患。而在混沌光通信系统中,信号的加密和解密步骤是基于硬件实现的,密钥是收发器的设备参数,因而可以从物理层实现对光纤通信系统的信息防护^[1]。

收稿日期:2019-03-09。

作者简介:郑亮(1989-),男,山西阳泉人,海军工程大学硕士研究生,91954 部队助理工程师,主要研究方向为海光缆通信技术、海光缆信息安全以及分布式光纤传感技术,参与过海光缆维修工程以及多个海光缆领域的科研项目。

* 通信作者:李秀玲(E-mail: lounade@163.com)。



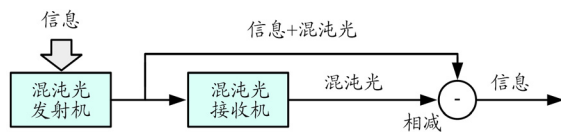
1990 年, L. M. Pecora 和 T. L. Carrol 等人发表了关于混沌同步的理论研究成果,并采用电路混沌的方法对理论进行了验证^[2],但是电路混沌系统受限于带宽和传输损耗,不适用于高速的加密通信。而激光混沌则完美克服了电路混沌的不足。1994 年, Roy 等人进行了第一次固体激光器之间的混沌同步实验^[3]。1998 年, VanWiggeren 等人首次实现了基于掺铒光纤激光器的混沌激光加密通信^[4]。2000 年后,混沌光通信的研究开始朝着实用化的方向发展。2005 年,在欧盟 OCCULT 项目的支持下,由雅典大学的 A. Argyris 领导的多国学者,在希腊商用环城光纤上以 1 Gb/s 的速率测试了混沌加密通信,传输距离为 120 km,误码率低于 10^{-7} ^[5]。

在各种混沌光源中,半导体激光器(SL)由于技术成熟、体积小和成本低,已成为光纤通信的主要光源。所以,基于 SL 的混沌光通信技术也成为了近些年研究的热点。本文主要针对 SL 混沌光通信的几大研究

重点,对近些年相关研究内容进行全面总结和讨论。

1 混沌光通信原理与关键技术

混沌是由确定的非线性系统产生的一种类似随机的运动,但与完全随机运动不同,其短期运动规律在已知系统参数的情况下可以预测,长期运动规律虽然不可预测,但是却存在一个运动的限制范围。混沌光通信利用激光器输出的混沌光作为载波,并将信息加载到发送端的混沌载波中,由于混沌光具有类似噪声的随机性,可以有效防范光纤链路中的窃听行为。在接收端,光信号被分为2路:其中一路注入一个与发射端参数相同的激光器,利用混沌同步效应得到载波信号,与另一路信号相减即可得到所加载的信息。其原理框图如图1所示。



1.1 混沌光的产生

混沌光根据产生原理可以分为基于激光器内部的非线性和基于激光器外部的非线性。本文主要是研究基于SL的混沌光通信,属于前一种情况。SL的速率方程如式(1)所示^[6]。

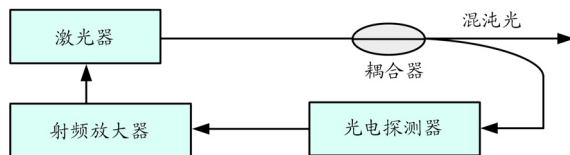
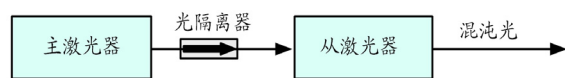
$$\begin{aligned} \frac{dE(t)}{dt} &= \frac{(1-\alpha i)}{2} \left(G(t) - \frac{1}{\tau_p} \right) E(t) \\ \frac{dN(t)}{dt} &= \frac{I}{q} - \frac{1}{\tau_n} N(t) - G(t) |E(t)|^2 \\ G(t) &= \frac{g(N(t) - N_0)}{1 + \varepsilon |E(t)|^2} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $E(t)$ 是缓慢变化的复电场, $N(t)$ 是载流子浓度, α 是线宽增强因子, τ_p , τ_n 是光子寿命和载流子寿命, N_0 是透明载流子数, I 是驱动电流, q 是电子电荷系数, g 是增益因子, ε 是增益饱和系数。

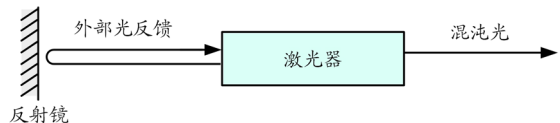
为了使SL产生混沌光,必须引入额外的扰动,主要方法有3种^[7]:

①外光注入法。外光注入法是指利用外部光源为激光器引入额外扰动,通过控制主、从激光器之间的注入强度和频率失配参数,使从激光器产生混沌光。其结构原理图如图2所示。

②光电反馈法。光电反馈方法是指将激光器发出的一部分激光分离成电信号,并在被射频放大后将其重新输入激光器,通过改变输入电流引入额外扰动,以实现混沌光的输出。其结构原理图如图3所示。



③外光反馈法。外光反馈法就是在激光器的输出端利用镜面或光栅等光器件将部分输出光重新注入到激光器中,利用自身输出作为扰动。由于反馈过程中激光的相位和强度都发生了改变,所以这一方法产生的混沌光复杂度是3种方法中最高的。2010年后,出现了基于外光反馈法的集成光器件^[8],这大大方便了混沌光通信的研究。目前,大多数基于SL的混沌光通信系统都采用这种方法^[7],其结构原理图如图4所示。



1.2 混沌调制

混沌调制的方案主要有3种:混沌隐藏、混沌调制和混沌键控^[9]。①混沌隐藏是将有用信息通过加法器叠加到混沌载波中,这一方法实现简单,但是信息功率必须远小于混沌载波功率才能实现安全的传输,所以在实际应用中信噪比恶化较严重且保密性较低。②混沌调制是通过外部调制器(乘法器)将信息调制到混沌载波中,这一方法将混沌信号的整个频域带宽都利用起来,所以保密性与抗噪性都要优于混沌隐藏方法。缺点是该调制方法的系统复杂性较高。③混沌键控的思路与前两者不同,是通过调制发射机某一参数(通常是输入电流),产生2个状态不同的混沌光,利用这2个混沌光来表示0和1从而传输信息,这一方法保密性较高,但是通信速率较慢。

1.3 混沌同步

混沌同步可分为开环和闭环。闭环同步时,接收端SL需要有和发射端相同的反馈结构,这一设计对收发端光器件参数的一致性要求更高,因此安全性更高。开环同步在接收端无反馈结构,对器件参数的要求不像闭环同步那么严格,因此系统鲁棒性更高,而

且开环同步达到同步态的时间更快,文献[10]研究得出两者时间相差约 1000 倍。因此,混沌光通信的实验大多都采用开环同步。

2 研究现状

2.1 SL 输出混沌光的时延隐藏特性研究

近些年,研究人员发现,利用自相关函数、延迟互信息量和时间序列重构等技术,可以从混沌信号中分析出激光器的反馈时延信息^[11,12]。窃听者只要知道系统时延,就有可能还原出混沌载波,进而破译得到加密传输的信息。所以如何改进 SL 的混沌光生成方式,得到具有宽参数选择范围、更强时延隐藏性能的混沌光成为了目前的研究热点。

2009 年, A. Bogris 等人提出了带有副载波调制技术的全光混沌光通信系统,可以极大提高混沌光通信的安全性^[13]。2010 年, J. Hizanidis 等人利用光电反馈和外光反馈复用方式来消除混沌光时延特性,并验证了其安全性^[14]。2012 年,香港城市大学的陈士骏课题组将外光反馈的平面镜换成了光纤布喇格光栅,对这一新反馈方式的研究表明,产生的混沌带宽和时延隐藏效果与光栅的长度相关^[15]。

近来研究发现,对于 SL 的各种外光反馈结构,只要其反馈外腔长度固定不变,那么产生的混沌光信号在频域仍然带有系统的时延信息。为此,研究人员开始研究在混沌光产生过程中,对光器件参数本身也进行加密。2011 年,张建忠等人研究采用随机相位调制器调制单反馈外腔 SL 的相位,并指出在合适的电流和反馈强度下,当随机信号分量数目达到 5 时,时延信息可以有效地被消除,同时不受随机信号速率的影响^[16]。2014 年,项水英等人对比分析了单反馈与双反馈的随机相位调制的时延隐藏特性,并指出在反馈强度较大且相位调制频率在弛豫振荡频率附近时,双反馈的时延隐藏效果要大大优于单反馈^[17]。2016 年,西南大学课题组提出将 2 个法布里-珀罗干涉仪作为双外腔构成双滤波反馈 SL,研究发现双腔反馈延时的取值在某些数值处具有较好的延时抑制效果^[18]。同年,电子科技大学课题组也采用随机双反馈相位调制技术实现了相位加密,得到了具有时延隐藏特性的混沌光,并利用这一系统实现了混沌光保密通信^[19]。2018 年,冯玉林等人对随机双反馈相位调制 SL 输出混沌光的时延特性与带宽影响因子进行了研究,并将该系统输出混沌光的时延抑制效果与双路分布反馈和单路相位调制反馈进行了对比分析,结果表明随机双反馈相

位调制 SL 输出混沌光的时延抑制效果是最好的^[20],系统结构原理图如图 5 所示。

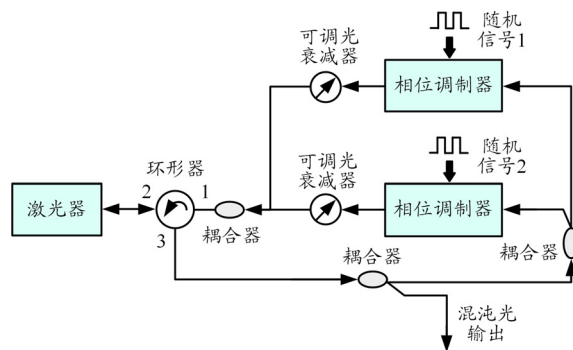
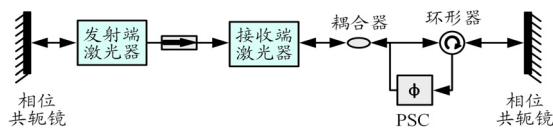


图 5 随机相位调制双反馈系统的结构原理图

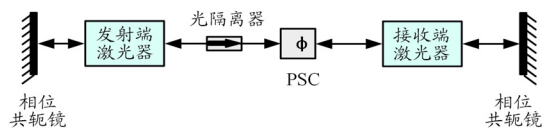
这种双反馈结构在原有的光器件参数密钥的基础上,添加了调制相位的随机信号作为新的密钥,所以其输出混沌具有较高的复杂度,而且混沌光的时延隐藏特性与随机信号的频率有关,频率越高时延隐藏特性就越好^[19]。

除了双反馈结构的激光器,相位共轭反馈的 SL 近几年也开始受到研究者的关注,2016 年,法国的 D. Rontani 等人对相位共轭反馈 SL 进行了理论研究,证明相较于普通的相位反馈 SL,相位共轭反馈 SL 发射信号的频谱平坦度和带宽都要更优,并且其时延峰值更小,能在更大的参数区域内被隐藏^[21]。2017 年, LI G L 等人仿真研究了基于相位共轭反馈 SL 的混沌同步,证明其可以用于混沌光通信^[22]。相位共轭反馈法得到的混沌光复杂度更高,而且带宽比普通的相位单反馈 SL 还宽 20%^[23]。

相位共轭反馈就是采用相位共轭镜来作为激光器的外光反馈器件,不同于普通相位反馈,相位共轭反馈产生的反馈光在反馈腔中来回往返不会累计相位,在相同的参数空间下,相位共轭反馈产生的混沌光比普通相位反馈的要宽 20%,并呈现出更高的复杂度。文献[23]对相位共轭反馈的混沌同步进行了理论推导,得出收发两端存在一个相移差值,通过引入相位控制器 (PSC) 可以构造 2 种基于相位共轭反馈 (PCF) 的混沌光通信系统,如图 6 所示。



(a) 在接收端反馈环中引入 PSC



(b) 在接收端混沌光注入前加入PSC

图6 基于PCF的闭环混沌同步结构

2.2 SL 输出混沌光带宽研究

作为混沌信号的重要指标,带宽影响着混沌光通信的传输速率,如何提高激光混沌系统的输出带宽,是近年来的研究热点。通过外光注入方法得到带宽增强的混沌信号,是最常见的提高SL混沌输出带宽的方法。2003年,日本的J. Ohtsubo等人在带有反馈腔的外光注入SL系统中,实现了混沌同步,带宽增强为普通光反馈SL输出带宽的3倍^[24]。2004年,S. K. Hwang等人通过调制注入光强度,产生了带宽35 GHz的混沌信号,并分析了注入强度和频率失谐对SL输出特性的影响^[25]。

研究表明,采用连续光注入SL可获得宽带混沌信号,但该方法所需的注入强度和频率失谐条件仅限于较小的参数区域,安全性较差^[26];相反,外光反馈SL可以在更大的参数范围内实现混沌输出,但是受到SL本身弛豫振荡频率的限制,混沌信号带宽通常较窄,低于10 GHz^[27]。所以近些年,研究人员开始采用多种扰动方式复用的方法,在增加带宽的同时提高混沌光的安全性。Wang等人采用连续光注入一个光反馈SL的办法,在保证混沌光安全性的同时,得到了3倍于单一光反馈SL输出的混沌带宽^[28];2012年,Xiang S Y等人研究了双混沌光注入的SL系统,证明与单注入的SL相比,双混沌光注入的SL具有更高的复杂度与更宽的带宽^[29]。2013年,Mu P等人系统地研究了基于双路混沌光注入SL的宽带混沌光的产生与同步,并得出在适当注入强度与频率失谐的条件下,有效光带宽可以达到35.84 GHz^[30]。2017年,Zhang L等人通过实验表明,若是外光注入SL系统的主激光器具有外光反馈的结构,则在低偏置电流和强反馈强度情况下,生成的混沌光在保持宽带宽的同时会具备较好的时延隐藏特性^[31]。图7是典型双注入SL系统。

过去,大多数关于SL输出混沌光的研究都是基于边发射激光器(EEL),近年来,人们纷纷将注意力转向基于垂直腔面发射激光器(VCSEL)的混沌光通信系统。相较于传统的EEL,VCSEL具有很多优势,如体积小、阈值电流低、发散角小和可实现单纵模光输出等。

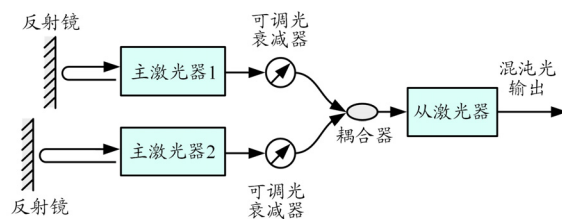


图7 双注入SL系统结构原理图

另外,由于VCSEL可以同时输出一组相互正交的偏振分量,因此便于实现混沌光通信系统的多路通信。2012年,Jiang N等人理论分析了通过VCSEL线性偏振模实现同步的双向双通道混沌光通信方案^[32]。2014年,Deng T等人研究了受带宽增强混沌信号驱动的2个相互耦合的VCSEL,提出一种双向双通道宽带混沌光通信系统,这一系统具有30 GHz以上的带宽,而且内部参数有较大的取值范围^[33]。2017年,张晓旭等人分析了单端反馈互耦合VCSEL的时延特性和带宽。结果表明有反馈端的VCSEL不能同时实现时延特征隐藏和带宽展宽,而无反馈端的VCSEL在合适的参数区间内则可以做到这一点^[34]。2018年,王珍珍等人研究了通过第三方VCSEL产生的混沌信号,驱动2个互耦合VCSEL的混沌同步方案,通过合理选取注入光强度,可以在得到高质量混沌同步的同时,拓展通信带宽并提高混沌光的安全性^[35],结构原理图如图8所示。

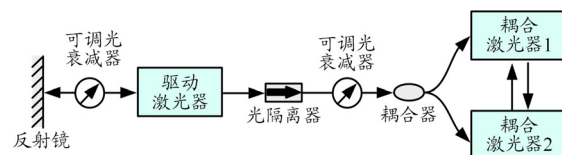


图8 混沌光注入互耦合VCSEL系统结构原理图

3 结束语

近年来,社会信息化进程不断加快,光通信技术正朝着安全、超高速和超大容量的方向快速发展,相应地,对混沌光通信的性能也提出了更高的要求。传统的添加单一扰动所产生的混沌光往往在安全性和带宽方面无法同时兼顾,所以,未来的趋势是研究如何结合多种扰动方式,产生安全性更高且带宽更宽的混沌光。在半导体激光器的选择方面,近年来,研究人员纷纷开始研究基于VCSEL的多扰动方式复用的混沌光通信系统,并利用VCSEL所具有的双偏振特性,着力构建更高安全度、更宽带宽的多路传输混沌光通信网络。

参考文献:

- [1] 谭联群, 吴俊. 光纤通信防窃听技术现状与展望[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(4): 87-90.
- [2] PECORA L M, CARROLL T L. Synchronization in chaotic systems[J]. Controlling Chaos, 1996, 6(8): 142-145.
- [3] ROY R, THORNBURG K S. Experimental synchronization of chaotic lasers[J]. Physical Review Letters, 1994, 72(13): 2009-2012.
- [4] VANWIGGEREN G D. Communication with Chaotic Lasers [J]. Science, 1998, 279: 1198-1200.
- [5] ARGYRIS A, SYVRIDIS D, LARGER L, et al. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links[J]. Nature, 2005, 437: 343-346.
- [6] 刘慧杰. 外光反馈半导体激光器动态特性及激光混沌保密通信的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [7] 陈祺炜. 光网络物理层中的安全脆弱性与光混沌保密技术[D]. 上海: 上海交通大学, 2015: 16-17.
- [8] ARGYRIS A, GRIVAS E, HAMACHER M, et al. Chaos-on-a-chip secures data transmission in optical fiber links [J]. Optics Express, 2010, 18(5): 5188-5198.
- [9] 姚俊良, 孙郁哲, 任海鹏. 混沌光纤通信研究进展与展望[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(2): 127-133.
- [10] VICENTE R, PEREZ T, MIRASSO C R. Open-versus closed-loop performance of synchronized chaotic external-cavity semiconductor lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(9): 1197-1204.
- [11] WU J G, XIA G Q, WU Z M. Suppression of time delay signatures of chaotic output in a semiconductor laser with double optical feedback [J]. Optics Express, 2009, 17(22): 20124-20133.
- [12] SORIANO M C, ZUNINO L, ROSSO O A, et al. Time scales of a chaotic semiconductor laser with optical feedback under the lens of a permutation information analysis [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2011, 47(2): 252-261.
- [13] ARGYRIS A, BOGRIS A, GILES I, et al. Subcarrier modulation boosts chaotic optical communication systems to error-free performance[C] // Conference on Optical Fiber Communication March 22-26, 2009, San Diego, America. Washington: OSA, 2009: 384-386.
- [14] HIZANIDIS J, DELIGIANNIDIS S, BOGRIS A, et al. Enhancement of Chaos Encryption Potential by Combining All-Optical and Electrooptical Chaos Generators[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(11): 1642-1649.
- [15] 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.
- [16] 张建忠, 王安帮, 张明江, 等. 反馈相位随机调制消除混沌半导体激光器的外腔长信息[J]. 物理学报, 2011, 60(9): 357-366.
- [17] XIANG S, PAN W, ZHANG L, et al. Phase-modulated dual-path feedback for time delay signature suppression from intensity and phase chaos in semiconductor laser[J]. Optics Communications, 2014, 324: 38-46.
- [18] 卢东, 钟祝强, 夏光琼, 等. 用双滤波反馈半导体激光器产生低延时特征的混沌信号[J]. 光子学报, 2016, 45(10): 19-24.
- [19] XUE C, JIANG N, LV Y, et al. Security-enhanced chaos communication with time-delay signature suppression and phase encryption [J]. Optics Letters, 2016, 41(16): 3690-3690.
- [20] 李增, 冯玉玲, 王晓茜, 等. 半导体激光器输出混沌光的延时特性和带宽[J]. 物理学报, 2018, 67(14): 87-95.
- [21] RONTANI D, MERCIER E, WOLFERSBERGER D, et al. Enhanced complexity of optical chaos in a laser diode with phase-conjugate feedback [J]. Optics Letters, 2016, 41(20): 4637-4640.
- [22] LI G L, JIANG N, LIN S Q, et al. Chaos synchronization in semiconductor lasers subject to phase-conjugate feedback[C]// International Conference on Optical Communications and Networks, August 1-3, 2017, Wuzhou, China. New York: IEEE, 2017.
- [23] 李桂兰. 基于相位加密反馈激光器的混沌保密通信研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [24] FUJIWARA N, TAKIGUCHI Y, OHTSUBO J. Observation of the synchronization of chaos in mutually injected vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers[J]. Optics Letters, 2003, 28(18): 1677-1679.
- [25] HWANG S K, LIU J M, WHITE J K. 35-GHz intrinsic bandwidth for direct modulation in 1.3- μ m semiconductor lasers subject to strong injection locking[J]. Photonics Technology Letters IEEE, 2004, 16(4): 972-974.
- [26] 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.
- [27] LENSTRA D. Relaxation Oscillation Dynamics in Semiconductor Diode Lasers With Optical Feedback [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(6): 591-593.
- [28] WANG A, WANG Y, HE H. 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.
- [29] XIANG S Y, PAN W, LUO B, et al. Wideband Unpredictability-Enhanced Chaotic Semiconductor Lasers With Dual-Chaotic Optical Injections[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2012, 48(8): 1069-1076.
- [30] MU P, PAN W, YAN L, et al. Route to broadband optical chaos generation and synchronization using dual-path optically injected semiconductor lasers [J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(21): 4867-4872.
- [31] ZHANG L, PAN W, MU P, et al. The Role of Master Laser with Feedback in Time-Delay Signature Suppression of Semiconductor Laser Subject to Chaotic Optical Injection [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2017, 27(11): 1750169-1-1750169-13.
- [32] JIANG N, PAN W, LUO B, et al. Bidirectional Dual-Channel Communication Based on Polarization-Division-Multiplexed Chaos Synchronization in Mutually Coupled VCSELs[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(13): 1094-1096.
- [33] DENG T, XIA G Q, WU Z M. 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.
- [34] 张晓旭, 吴天安, 常凯歌, 等. 单端反馈互耦合垂直腔面发射激光器混沌输出的时延特征和带宽分析[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 67-73.
- [35] 王珍珍, 陈建军, 高子叶, 等. 基于混沌光注入互耦合 VCSELs 获取高复杂度混沌同步信号的研究 [J]. 西南师范大学学报 (自然科学版), 2018, 43(3): 50-57.