

基于半导体环形激光器的混沌安全保密通信

张定梅

(荆楚理工学院 数理学院, 湖北 荆门 448000)

摘要:为了满足保密通信的需求,提出了一种基于3个半导体环形激光器(SRL)进行双路混沌通信的方案,数值仿真后给出了几种情况下的时间序列、自相关图与眼图,并讨论了传输距离对通信质量的影响。研究表明:驱动SRL(D-SRL)仅在自反馈的条件下混沌信号质量较差;当引入互反馈后,混沌质量明显提高;随着传输距离的增加,量化保密通信质量的品质因子逐渐降低,但当距离增加到130 km时,品质因子依然保持在6以上,该方案可以进行长距离双通道安全保密通信。

关键词:非线性光学;半导体环形激光器;保密通信;混沌;反馈

中图分类号: TN929.11; O437.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)10-0037-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.10.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Chaos secure communication based on semiconductor ring laser

ZHANG Dingmei

(School of Mathematics and Physics, Jingchu University of Technology, Jingmen Hubei 448000, China)

Abstract: In order to satisfy the demand of secure communication, a scheme of dual-channel chaos communication based on three semiconductor ring lasers (SRL) is proposed. The time series, autocorrelation diagrams and eye diagrams under different conditions are given through numerical simulation, and the influence of transmission distance on communication quality is also discussed. The research show that the quality of chaos signal is poor for the drive SRL (D-SRL) subjected to self-feedback, after introducing mutual feedback, the quality of chaos is significantly improved. As the transmission distance increases, the quality factor to quantify the quality of secure communication gradually decreases, but when the distance increases to 130 km, the quality factor remains above six. This scheme enables long-distance dual-channel secure communication.

Key words: nonlinear optics; semiconductor ring laser; secure communication; chaos; feedback

0 引言

半导体激光器在外部光反馈、光电反馈和光注入下可产生单周期、多周期和混沌等丰富的动力学态^[1-3]。其中,光学混沌由于具有对初始条件的极度敏感性和高度的无序性而可用在随机数产生、混沌激光雷达、光学逻辑门和安全保密通信中^[4-7]。成功实现混沌安全保密通信的前提是要求发射激光器与接收激光器的混沌同步,即发射器产生的混沌信号与接收端的混沌

信号完全相似。自从1990年PECORA L M和CARROLL T L等人^[8]首次提出了混沌同步的概念后,基于半导体激光器产生的光学混沌在保密通信中的研究已经有大量报道^[9-15]。例如,2005年,ARGRIS A等人^[12]首次在雅典地铁网络中实现了基于马赫-曾德尔调制器的混沌光保密通信实验,成功实现了速度为2.4 Gb/s、传输距离大于120 km的信息传输。2010年,LAVROV R等人^[13]基于马赫-曾德尔干涉仪实现了距离在100 km以上的混沌光通信传输,传输速度提高到了10 Gb/s。2017年,UCHINA课题组^[14]报道了一种新的光混沌键控系统,他们将二进制消息嵌入到混沌光波中并利用光纤电缆进行传输,在接收机处使用与发射激光器同步的混沌激光成功进行了解码。2018年,KE J X等人^[15]报道了距离大于100 km、传输速度大于30 Gb/s的高速混沌光安全通信系统。

半导体环形激光器(SRL)由于其特殊的谐振腔结构而在光子集成电路中得到了广泛的应用^[16]。SRL有

收稿日期:2020-03-23。

基金项目:荆楚理工学院2018年度校级科学研究项目(YB201802)资助;2020年度湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(B2020194、B2020197)资助。

作者简介:张定梅(1981—),女,湖北江陵人,2007获重庆大学硕士学位,现为荆楚理工学院讲师,担任光电电子技术、光电探测及信号处理等课程的教学任务,主要从事非线性光学及半导体激光器非线性动力学方面的研究工作。参与省部级项目2项,主编教材1部。



源腔的圆形几何结构,允许激光器在 2 种可能的模式工作,即顺时针(CW)和逆时针(CCW)模式^[17-18]。2003 年, SOREL M 等人^[19]首先提出了基于 GaAs-ALGaAs 材料的 SRL 的理论模型,该模型成功地解释了实验中所观察到的 2 种模式的竞争现象。然而,现有的关于 SRL 的研究大都集中在 2 种模式的模式竞争和动力学上面^[20-27],关于混沌同步通信的研究还较少。由于 SRL 有 2 种工作模式,这为双路混沌保密通信提供了可能。本文利用 3 个 SRL 建立双路混沌安全保密通信体系,即首先利用光反馈技术使得驱动 SRL 工作在混沌态,然后将混沌光注入到 2 个响应 SRL 中并进行同步。成功同步后利用非归零的二进制码进行保密通信性能测试。

1 双路混沌安全保密通信理论模型

基于 3 个 SRL 的混沌安全保密通信的示意图如图 1 所示。其中,D-SRL、R-SRL 分别表示驱动 SRL 和响应 SRL,CW 和 CCW 表示 2 种工作模式。D-SRL 在互和自反馈的情况下产生混沌信号,然后注入到 R-SRL1 和 R-SRL2 中,R-SRL1 和 R-SRL2 实现混沌同步;左侧 m_1 和 m_2 表示加进去的 2 路非归零的二进制码,右侧 m_1 和 m_2 表示 2 路同步后解译出的二进制码。考虑每个激光器的电场强度和载流子数后,基于 3 个 SRL 的混沌保密通信的激光器速率方程可以表示如下^[19]:

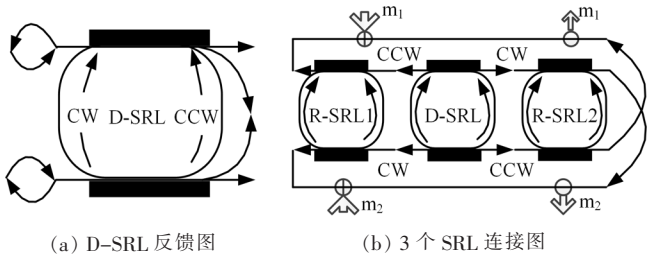


图 1 SRLs 双路混沌安全保密通信示意图

$$\frac{dE_{CW}^D}{dt} = \kappa(1+i\alpha) \left[g_{CW}^D N^D - 1 \right] E_{CW}^D - (k_d + ik_c) E_{CW}^D + K_1 E_{CCW}^D(t-T_1) e^{-i\omega T_1} K_3 E_{CW}^D(t-T_3) e^{-i\omega T_3} \quad (1)$$

$$\frac{dE_{CCW}^D}{dt} = \kappa(1+i\alpha) \left[g_{CCW}^D N^D - 1 \right] E_{CCW}^D - (k_d + ik_c) E_{CCW}^D + K_2 E_{CW}^D(t-T_2) e^{-i\omega T_2} K_3 E_{CCW}^D(t-T_3) e^{-i\omega T_3} \quad (2)$$

$$\frac{dE_{CW}^{R_1, R_2}}{dt} = \kappa(1+i\alpha) \left[g_{CW}^{R_1, R_2} N^{R_1, R_2} - 1 \right] E_{CW}^{R_1, R_2} - (k_d + ik_c) E_{CW}^{R_1, R_2} + k_{inj} E_{CW}^D e^{i(2\pi\Delta f t - \omega\tau)} \quad (3)$$

$$\frac{dE_{CCW}^{R_1, R_2}}{dt} = \kappa(1+i\alpha) \left[g_{CCW}^{R_1, R_2} N^{R_1, R_2} - 1 \right] E_{CCW}^{R_1, R_2} - (k_d + ik_c) E_{CCW}^{R_1, R_2} + k_{inj} E_{CCW}^D e^{i(2\pi\Delta f t - \omega\tau)} \quad (4)$$

$$\frac{dN^{D, R_1, R_2}}{dt} = \gamma \mu^{D, R_1, R_2} - N^{D, R_1, R_2} - g_{CW}^{D, R_1, R_2} N^{D, R_1, R_2} \times \left| E_{CW}^{D, R_1, R_2} \right|^2 - g_{CCW}^{D, R_1, R_2} N^{D, R_1, R_2} \left| E_{CCW}^{D, R_1, R_2} \right|^2 \quad (5)$$

$$g_{CW}^{D, R_1, R_2} = \left(1 - s \left| E_{CW}^{D, R_1, R_2} \right|^2 - m \left| E_{CCW}^{D, R_1, R_2} \right|^2 \right) \quad (6)$$

$$g_{CCW}^{D, R_1, R_2} = \left(1 - s \left| E_{CCW}^{D, R_1, R_2} \right|^2 - m \left| E_{CW}^{D, R_1, R_2} \right|^2 \right) \quad (7)$$

其中, E 表示电场强度, N 表示载流子数, g 表示增益系数, t 表示时间变量。上标 D、 R_1 和 R_2 分别表示 D-SRL 和 2 个 R-SRL, K_1 、 K_2 为 D-SRL 的互速率,其中 K_1 表示 CCW 模反馈到 CW 模的速率, K_2 表示 CW 模反馈到 CCW 模的速率。 T_1 、 T_2 为反馈延迟时间, K_3 为自反馈速率, T_3 为自反馈时间, k_{inj} 表示注入系数, Δf 表示频率失谐。其余的仿真参数如表 1 所示。

表 1 SRL 的仿真参数

参数	物理含义	取值
κ	电场衰减率	0.1 ps ⁻¹
γ	载流子衰减率	0.2 ns ⁻¹
s	自饱和系数	5×10 ⁻³
m	互饱和系数	1×10 ⁻²
k_d	耗散系数	3.3×10 ⁻² ns ⁻¹
k_c	保守系数	0.44 ns ⁻¹
α	线宽增强因子	3.5
τ	注入光的飞行时间	3 ns
μ	归一化偏置电流	1.4
ω	自由运行角频率	1.2161×10 ¹⁵ Hz

为了衡量混沌信号的时间延迟特征和同步质量的好坏,本文采用自相关函数和互相关函数来进行量化,自相关函数的数学定义式为:

$$C(\Delta t) = \langle [x_1(t) - \langle x_1(t) \rangle] [x_{2s}(t) - \langle x_{2s}(t) \rangle] \rangle \sqrt{\langle [x_1(t) - \langle x_1(t) \rangle]^2 \rangle \langle [x_{2s}(t) - \langle x_{2s}(t) \rangle]^2 \rangle} \quad (8)$$

其中, $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 为任意 2 个向量,下标 S 表示移动了时间 Δt , $\langle \cdot \rangle$ 表示时间平均。当 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 相等时, C 为自相关;当 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 不相等时, C 为互相关。

光在光纤中传播满足非线性薛定谔方程为:

$$i \frac{\partial P}{\partial l} = -\frac{i}{2} \xi P + \frac{1}{2} \varepsilon \frac{\partial^2 P}{\partial H^2} - \eta |P|^2 P \quad (9)$$

其中, P 为电场振幅, ξ 为光纤损耗系数, ε 为光纤色散系数, η 为光纤非线性系数, l 为传输距离, H 为环境温度。此外,采用 Q 因子来进行评估通信质量的好坏, Q 因子值(下文简称 Q 值)的计算如式(10)所示。

$$Q = \frac{\overline{W_1} - \overline{W_0}}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad (10)$$

其中, $\overline{W_1}$ 和 $\overline{W_0}$ 分别为比特 1 和 0 的平均功率, σ_1 和 σ_0 分别为比特 1 和 0 的功率标准差。

2 结果与分析

2.1 D-SRL 产生混沌信号

D-SRL 在自反馈下的时间序列及自相关值随时间的分布如图 2 所示。自反馈参数分别为 $K_3=10 \text{ ns}^{-1}$ 、 $T_3=9 \text{ ns}$ 。图 2(a)、图 2(b) 是 2 种模式下输出的时间序列混沌态图。在此反馈参数下, D-SRL 输出的时间序列显示出无序的振荡状态, 无明显的周期性, 说明此激光器已经进入了混沌态。外光反馈引起的激光器动力学的改变已经有大量的报道^[3-6], 产生的物理原因是由于外腔模与腔内模共同竞争的结果。自相关值随延迟时间的分布如图 2(c)、图 2(d) 所示, 这里只考虑了时间移动从 $-10 \sim 10 \text{ ns}$ 的情况。2 种模式的自相关分布几乎相同, 这是由于对称的自反馈引起的。自相关在 $\pm 9 \text{ ns}$ 和 0 ns 处出现了极值, 0 处的极值是 1 是由于自身相关造成的, 而 $\pm 9 \text{ ns}$ 处的极值是由于反馈时延造成的, 自相关值为 0.6 , 为强相关, 时延特征明显。较强时延特征的混沌信号将影响混沌保密通信的安全性, 为了消除此时延, 本文在自反馈的基础上再引入互反馈, 通过 2 种反馈的共同作用来消除时延。

D-SRL 在自反馈和互反馈作用下的时间序列及自相关分布图如图 3 所示。反馈参数分别为 $K_1=8 \text{ ns}^{-1}$ 、 $T_1=5 \text{ ns}$ 、 $K_2=7 \text{ ns}^{-1}$ 和 $T_2=8 \text{ ns}$ 。图 3(a)、图 3(b) 是 2 种模

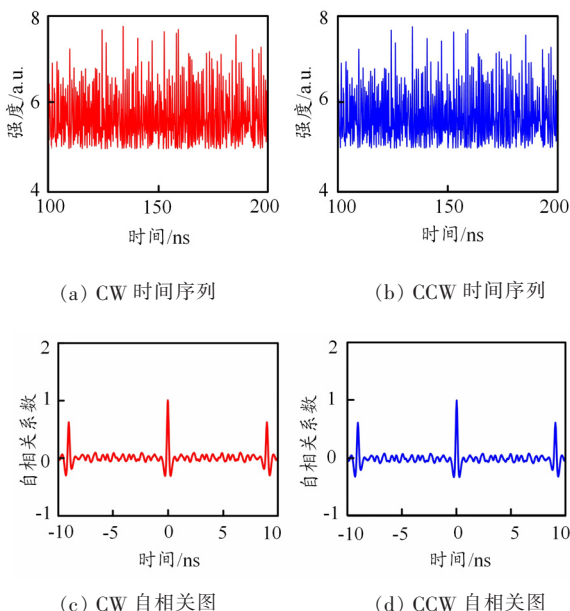


图 2 D-SRL 自反馈下的时间序列及自相关值分布图

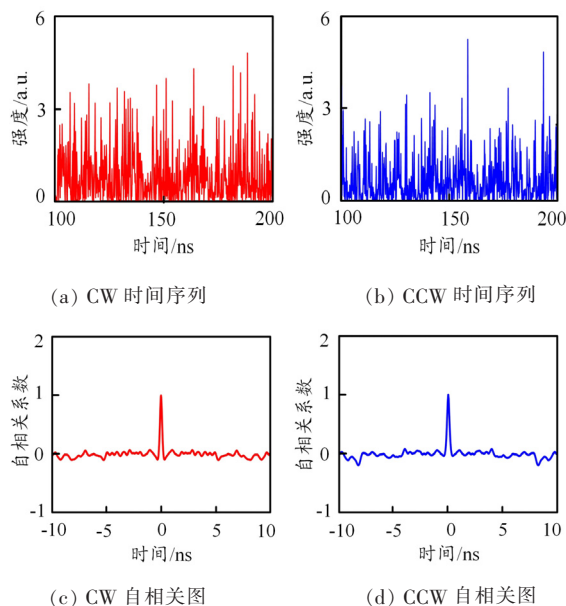
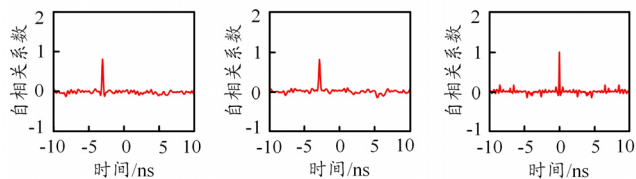


图 3 D-SRL 在自反馈与互反馈下的时间序列及自相关分布图

式下输出的时间序列混沌态图。由于多个反馈的引入, 混沌时间序列的复杂程度明显变高。图 3(c)、图 3(d) 是 2 种模式的自相关分布图。可以看出, 与图 2(c)、图 2(d) 相比, $\pm 9 \text{ ns}$ 处由反馈引起的峰值被明显压低了, 并且除了图 3(d) 中 $\pm 8 \text{ ns}$ 处的自相关系数的值为 0.18 以外(弱相关), 混沌信号已经无明显时延特征。这是由于互反馈的加入使得腔内出现了多个模式的竞争, 使混沌信号复杂度变高而降低了时延特征。对于低时延特征的混沌信号, 第三方窃听者不易重构激光器参数, 因而也不容易破解混沌信号所携带的通信信息。本文将此低时延的混沌信号注入到 2 个 R-SRL 中, 研究 D-SRL 与 R-SRL1, R-SRL2 的同步情况。

2.2 D-SRL 与 R-SRL 的同步

D-SRL 与 R-SRL1、R-SRL2 互相关系数随时间的分布图如图 4(a)、图 4(b) 所示。可以看出, 在 -3 ns 处出现了一个峰值(自相关系数), 峰值为 0.81 。此处出现峰值的原因是注入时延引起的, 由于 D-SRL 与 R-SRL 的同步系数不高, 因此不能用来进行混沌保密通信。R-SRL1 与 R-SRL2 的互相关图如图 4(c) 所示, 2 个 R-SRL 输出的时间序列具有较好的同步性能, 在



(a) D-SRL 与 R-SRL1 (b) D-SRL 与 R-SRL2 (c) R-SRL1 与 R-SRL2

图 4 互相关系数随时间的分布图

时间为 0 处出现的自相关系数极值接近 1, 因此可以利用 2 个 R-SRL 进行混沌保密通信。由于 D-SRL 与 R-SRL 的同步系数不高, 第三方就不容易破解混沌信号。本文将利用 2 个 R-SRL 进行混沌保密通信, 选择 CW 和 CCW 2 种工作模式, 同步的信号为非归零的二进制随机码。

2.3 传输距离对通信质量的影响

传输距离为 20 km 时, R-SRL1 与 R-SRL2 的混沌保密通信图如图 5 所示。D-SRL 和 R-SRL 的参数与图 3 中的参数相同。其中, 速率为 2 Gb/s 的非归零

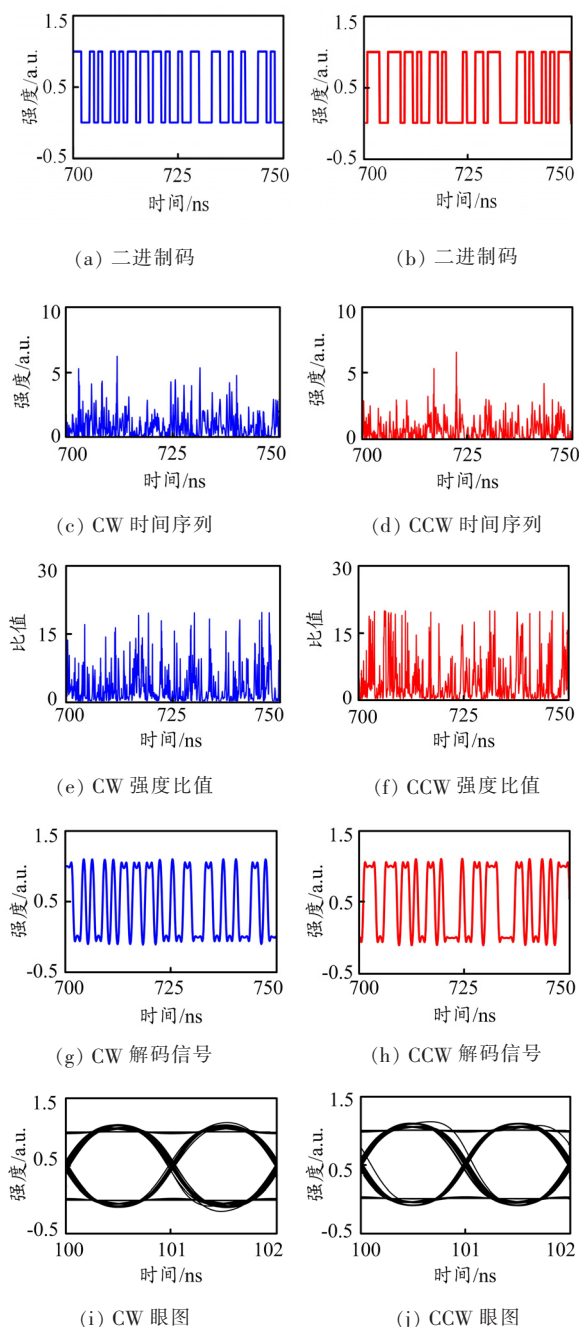


图 5 传输距离为 20 km 时 R-SRL1 与 R-SRL2 的混沌保密通信图

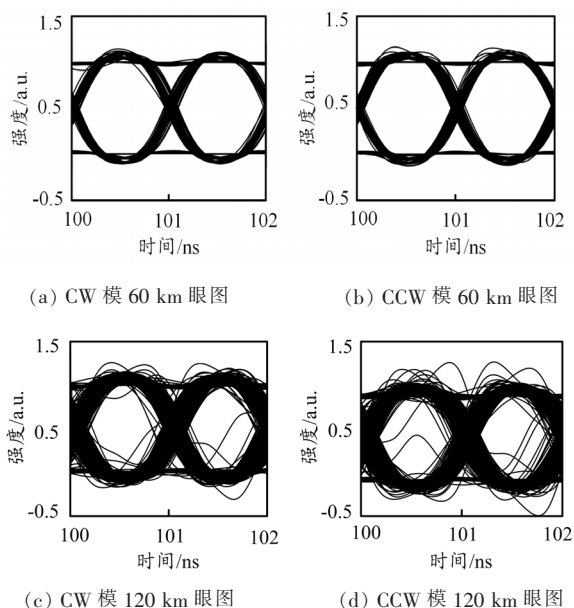


图 6 传输距离为 60 km 和 120 km 时 2 种模式上的眼图

二进制随机信号如图 5(a)、图 5(b)所示, 在 R-SRL1 的 2 种模式输出的时间序列上加上信号后输出的时间序列如图 5(c)、图 5(d)所示。从如图 5(e)、图 5(f)可以看出, 信号光强度与输出混沌光强度的比值作无规则振荡, 看不出任何有关于信号的相关特征, 信号被成功地隐藏到了混沌时间序列中, 第三方窃听者不易从该时间序列中破解出传递信号。从 R-SRL2 处解调出的二进制信号如图 5(g)、图 5(h)所示, 因为 R-SRL1 与 R-SRL2 是同步的, 与图 5(a)、图 5(b)相比, 信号的扭曲变形主要是由于光纤中的色散损耗和非线性扭曲引起的; 信号眼图如图 5(i)、图 5(j)所示, 眼图清晰可见, 说明通信质量较高。

当信号传输距离分别为 60 km 和 120 km 时, CW 和 CCW 双路混沌保密通信的眼图如图 6 所示。当传输距离增加到 60 km 时, CW 和 CCW 2 种模式通信的眼图质量有所下降, 这是由于随着传输距离的增加, 光纤中的非线性介质对光信号的扭曲累积增加所致。但眼图中间部分依然清晰, 能够满足混沌保密通信需求。当传输距离增加到 120 km 时, 眼图质量进一步下降。

Q 值随传输距离的变化曲线如图 7 所示。当传输距离小于 20 km 时, Q 值保持在 14 以上; 当传输距离大于 20 km 时, Q 值随着传输距离的增加逐渐下降。但即使当传输距离增加到 130 km 时, Q 值仍

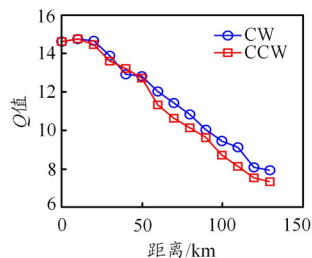


图 7 Q 值随传输距离的变化图

然保持在 6 以上,相应的误码率低于 10^{-9} 。这说明该系统具有远程混沌保密通信的能力,不需要中转站来增加成本。

3 结束语

本文研究了 3 个 SRL 构成的双路混沌保密通信系统的特性。当 D-SRL 仅在有反馈作用下时,产生的混沌信号时延特征较强,不利于安全保密通信。引入互反馈后,混沌信号的质量得到了明显的改善。用 D-SRL 的输出信号来驱动 2 个 R-SRL,发现 D-SRL 与 R-SRL1、R-SRL2 的同步系数仅有 0.81。但 R-SRL1 与 R-SRL2 的输出混沌信号的同步系数近似等于 1,这表明利用 2 个 R-SRL 可以顺利完成安全保密通信,并且信号的传输是单路的,不易被第三方破解。最后讨论了传输距离对通信质量的影响,并用品质因子 Q 进行了量化,量化结果表明采用这种方案进行远距离安全保密通信是可行的。

参考文献:

- [1] YAN S L. Period-control and chaos-anti-control of a semiconductor laser using the twisted fiber[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(9): 257–263.
- [2] CHEN J J, Duan Y N, LI L F, et al. Wideband polarization-resolved chaos with time-delay signature suppression in VCSELs subject to dual chaotic optical injections[J]. IEEE Access, 2018, 6(1): 66807–66815.
- [3] LIN F Y, LIU J M. Nonlinear dynamics of a semiconductor laser with delayed negative optoelectronic feedback [J]. IEEE Journal Quantum Electronics, 2003, 39(4): 562–568.
- [4] UCHIDA A, AMANO K, INOUE M, et al. Fast physical random bit generation with chaotic semiconductor lasers [J]. Nature Photonics, 2008, 2(12): 728–732.
- [5] VIRTE M, MERCIER E, THIENPONT H, et al. Physical random bit generation from chaotic solitary laser diode [J]. Optics Express, 2014, 22(14): 17271–17280.
- [6] LIN F Y, LIU J M. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(6): 815–820.
- [7] CHLOUVERAKIS K E, ADAMS M J. Optoelectronic realization of NOR logic gate using chaotic two-section lasers [J]. Electronics Letters, 2005, 41(6): 359–360.
- [8] PECORA L M, CARROLL T L. Synchronization in chaotic systems[J]. Controlling Chaos, 1996, 6(8): 142–145.
- [9] OHTSUBO J. Chaos synchronization and chaotic signal masking in semiconductor lasers with optical feedback [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(9): 1141–1154.
- [10] LIU J M, CHEN H F, TANG S. Synchronized chaotic optical communications at high bit rates[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(9): 1184–1196.
- [11] JIANG N, PAN W, YAN L, et al. Chaos synchronization and communication in mutually coupled semiconductor lasers driven by a third laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(13): 1978–1986.
- [12] ARGYRIS A, SYVRIDIS D, LARGER L, et al. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links [J]. Nature, 2005, 438(7): 343–346.
- [13] LAVROV R, JACQUOT M, LARGER L. Nonlocal nonlinear electro-optic phase dynamics demonstrating 10Gb/s chaos communications [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(10): 1430–1435.
- [14] LAWRENCE A J, PAPAMARKOU T, UCHIDA A. Synchronized laser chaos communication: statistical investigation of an experimental system[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2017, 53(2): 210–214.
- [15] KE J X, YI L L, XIA G Q, HU W S. Chaotic optical communications over 100km fiber transmission at 30Gb/s bit rate [J]. Optics Letters, 2018, 43(6): 1323–1326.
- [16] KRAUSS T, LAYBOURN P J R, ROBERTS J. CW operation of semiconductor ring lasers [J]. Electronics Letters, 1990, 26(25): 2095–2097.
- [17] PÉREZ T, SCIRÈ A, VANDER S G, et al. Bistability and all-optical switching in semiconductor ring lasers [J]. Optics Express, 2007, 15(20): 12941–12948.
- [18] GAETAN F, VAN DER SANDE G, MULHAM K, et al. Stability of steady and periodic states through the bifurcation bridge mechanism in semiconductor ring lasers subject to optical feedback [J]. Optics Express, 2017, 25(1): 339–350.
- [19] SOREL M, GIULIANI G, SCIRÈ A. Operating regimes of GaAs – AlGaAs semiconductor ring lasers: experiment and model[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003, 39(10): 1187–1193.
- [20] JAVALOYES J, BALLE S. All-optical directional switching of bistable semiconductor ring lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2011, 47(8): 1078–1085.
- [21] MASHA L, NGUIMDO R M, VAN DER SANDE G, et al. Low-frequency fluctuations in semiconductor ring lasers with optical feedback [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2013, 49(9): 790–797.
- [22] NGUIMDO R M, VERSCHAFFELT G, DANCKAERT J, et al. Loss of time-delay signature in chaotic semiconductor ring lasers [J]. Optics Express, 2012, 37(13): 2541–2543.
- [23] LI S S, LI X Z, ZHUANG J P, et al. Square-wave oscillations in a semiconductor ring laser subject to counter-directional delayed mutual feedback[J]. Optics Letters, 2016, 41(4): 812–815.
- [24] SUNADA S, HARAYAMA T, ARAI K, et al. Random optical pulse generation with bistable semiconductor ring lasers[J]. Optics Express, 2011, 19(8): 7439–7450.
- [25] MASHAL L, VAN DER SANDE G, GELENS L, et al. Square-wave oscillations in semiconductor ring lasers with delayed optical feedback[J]. Optics Express, 2012, 20(20): 22503–22516.
- [26] LI N Q, NGUIMDO R M, LOCQUET A, et al. Enhancing optical-feedback-induced chaotic dynamics in semiconductor ring lasers via optical injection[J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 92(2): 315–324.
- [27] VERSCHAFFELT G, KHODER M, VAN DER SANDE G. Optical feedback sensitivity of a semiconductor ring laser with tunable directionality[J]. Photonics, 2019, 6(4): 112–115.