

引用本文:王飞,周雪芳.一种基于半导体激光器光混沌的双向通信系统[J].光通信技术,2023,47(3):52-55.

一种基于半导体激光器光混沌的双向通信系统

王飞,周雪芳*

(杭州电子科技大学 通信工程学院,杭州 310018)

摘要:针对光混沌保密通信中信息同步条件苛刻的问题,提出一种基于光混沌的双向通信系统。首先,通过半导体激光器(SL)发出的2束激光与部分半透明光学反射镜进行耦合,产生混沌动力,并根据SL的延迟速率方程,设置2个SL的内部参数产生同步的混沌载波;然后,通过监测两端信息的同步误差,并与接收端信息比较,得到解密信息。仿真分析了系统的同步性、信息解密过程、鲁棒性。仿真结果表明,该系统能实现同步通信,恢复出保密信息,鲁棒性较好。

关键词:光混沌;同步通信;保密通信;半导体激光器;延迟速率方程

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)03-0052-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.03.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Bidirectional communication system based on semiconductor laser optical chaos

WANG Fei, ZHOU Xuefang*

(School of Communication & Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problem of harsh information synchronization conditions in optical chaotic confidential communication, a bidirectional communication system based on optical chaos is proposed. First, two laser beams emitted by a semiconductor laser (SL) are coupled with a partially translucent optical mirror to generate chaotic power, and the internal parameters of two SLs are set to generate synchronous chaotic carriers according to the delay rate equation of SL. Then, the decryption signal is obtained by monitoring the synchronization error of the signals at both ends and comparing with the signals at the receiving end. The synchronization, signal decryption process and robustness of the system are simulated and analyzed. The simulation results show that the system can realize synchronous communication, recover the secret signal and has good robustness.

Key words: optical chaos, synchronous communication, secure communication, semiconductor laser, delayed light rate equation

0 引言

半导体激光器(SL)因制造成本低、质量与体积较小,在混沌保密通信中有着举足轻重的地位^[1]。混沌保密通信的特点是将振幅远大于所需要传输信息的混沌信息作为传输信息的载体,因此很难将被传输的信息直接从混沌载波中分离出来。于是,文献[2]采用混沌载波完全同步的方式,监测接收端输入与输出的同

步误差来恢复信息。但是,这种同步方式需要严格控制硬件的参数和初始值,使发射机和接收机的内部参数完全一致才可实现。因此,本文提出一种基于SL光混沌的双向通信系统,在全光反馈产生混沌的基础上,通过2束激光与部分透明反射镜相互耦合产生同步的混沌信息,实现信息的保密发送与解密接收。

1 系统理论模型

基于SL光混沌的双向通信系统结构如图1所示。结构完全一致的SL₁和SL₂产生2束激光通过部分透明反射镜(M)相互耦合,每个SL收到的光包括M延迟后反馈回的光和另一SL发出的光。 $m_1(t)$ 与 $m_2(t)$ 分别为发射端与接收端的编码信息(t 表示时间),它们通过相位调制器(PM)进入SL,以偏置电流来实现信息编码。信息的解密则是通过监测2个SL的同步误差来实现的。

收稿日期:2022-11-22。

作者简介:王飞(1999—),男,河北衡水人,硕士研究生,现就读于杭州电子科技大学通信工程学院信息与通信工程专业,主要研究方向为光混沌同步保密通信、光通信、非线性光学等方面,参与了研究课题“产生安全混沌同步载波的方法”。

* **通信作者:**周雪芳(1976—),女,江西丰城人,副教授,硕士生导师,主要研究方向为光通信技术和光纤传感技术。



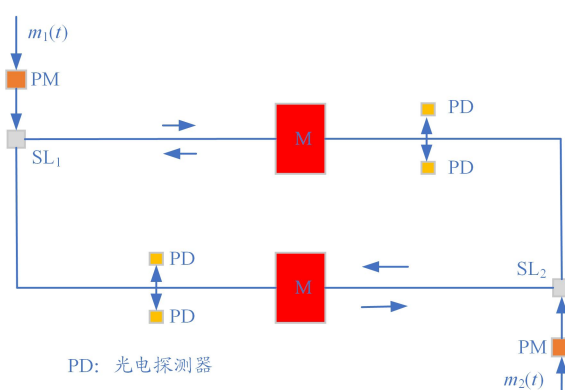


图1 基于SL光混沌同步的双向通信系统示意图

系统中,需要设置光反馈与耦合的时间大于SL弛豫振荡周期,而且保证传输系数高于产生混沌同步的阈值。SL之间的距离不影响其动力学状态,M也不影响2个SL之间的混沌动力学状态(M只起到延迟反馈的作用)。

本文采用Lang-Kobayashi速率方程^[3-4]来描述该理论模型的动力学特征。SL₁和SL₂的延迟速率方程分别为

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 = & i\Delta\omega_1 E_1 + \frac{1}{2}(1+i\alpha)G(N_1, \|E_1\|)E_1 + \\ & \kappa_{2,1}\exp(i\varphi_{2,1})E_2(t-\tau_{d,1}-\tau_{d,2}) + \\ & b_{1,1}\exp(i\varphi_{p,1})E_1(t-2\tau_{d,1}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_2 = & i\Delta\omega_2 E_2 + \frac{1}{2}(1+i\alpha)G(N_2, \|E_2\|)E_2 + \\ & \kappa_{1,2}\exp(i\varphi_{1,2})E_1(t-\tau_{d,1}-\tau_{d,2}) + \\ & b_{1,2}\exp(i\varphi_{p,2})E_2(t-2\tau_{d,2}) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $E_n(t)$ ($n=1,2$)为SL_n产生的光场复振幅, $b_{1,n}$ 为激光通过M反馈回的反馈系数, $\kappa_{1,2}, \kappa_{2,1}$ 为2束激光的耦合系数, $\varphi_{2,1}, \varphi_{1,2}$ 为2束激光的相位, $\varphi_{p,1}, \varphi_{p,2}$ 为M反馈回的激光的相位, $\tau_{T,1}, \tau_{T,2}$ 分别为耦合、反馈的延迟时间, N_1, N_2 分别为发射端和接收端相应的波数, α 为线宽增强因子, $\Delta\omega_n$ 为失谐频率。 N_1, N_2 的微分方程分别为

$$\dot{N}_1 = \frac{I_1}{e} - \gamma_e N_1 - G(N_1, \|E_1\|) \|E_1\|^2 \quad (3)$$

$$\dot{N}_2 = \frac{I_2}{e} - \gamma_e N_2 - G(N_2, \|E_2\|) \|E_2\|^2 \quad (4)$$

其中, I_n 为偏置电流, γ_e 为和载波衰减率, $\|E_n\|^2$ 为腔内的光子数。 $G(N_n, \|E_n\|)$ 为系统的增益函数,其表达式如下:

$$G(N_1, \|E_1\|) = \frac{g(N_1 - N_0)}{1 + q \|E_1\|^2} - \gamma \quad (5)$$

$$G(N_2, \|E_2\|) = \frac{g(N_2 - N_0)}{1 + q \|E_2\|^2} - \gamma \quad (6)$$

其中, g 为差速增益, N_0 为载流子数, q 为饱和系数, γ 为光子衰减率。

本文以2个SL间的相关系数 $\rho(t)$ 来表示系统的同步程度,其表达式为

$$\rho(t) = \frac{\langle [s_T(t) - \langle s_T(t) \rangle] \times [s_R(t + \Delta t) - \langle s_R(t) \rangle] \rangle}{[s_T(t) - \langle s_T(t) \rangle]^{1/2} [s_R(t) - \langle s_R(t) \rangle]^{1/2}} \quad (7)$$

其中, $s_T(t), s_R(t)$ 分别为SL₁,SL₂的混沌载波复振幅。

当 $\rho(t)$ 值靠近0时,表示系统的混沌同步质量极差,几乎不同步,所以要重新调整混沌系统的内部参数;当 $\rho(t)$ 值靠近1甚至等于1时,表示系统混沌同步质量非常好,因此本文采用此时混沌系统的内部参数。

由于较大的反馈系数会增强系统产生混沌信息的能力,但会影响系统的同步性能;较大的耦合系数会阻碍混沌信息的产生,但会提高系统的同步性能。因此,本文根据文献[4]选取合适的反馈系数和耦合系数,具体参数如表1所示。

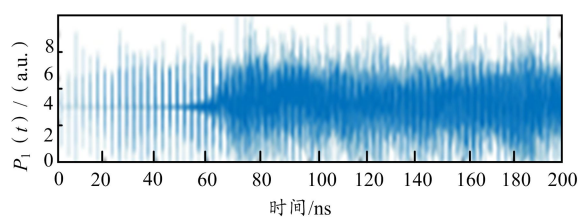
表1 实验所需数据值

参数	数值
线宽增强因子 a	3
差速增益 g/ns^{-1}	1.2×10^{-5}
载流子数 $N_0/\text{个}$	1.25×10^8
饱和系数 q	5×10^{-7}
光子衰减率 γ/ns^{-1}	496
载波衰减率 γ_e/ns^{-1}	0.651
阈值电流 I_0/mA	17.3
频率失谐 $\Delta\omega_n$	0
反馈系数 $b_{1,n}/\text{ns}^{-1}$	20
耦合系数 $\kappa_{1,2}, \kappa_{2,1}/\text{ns}^{-1}$	20
耦合延迟时间 $\tau_{d,1}/\text{ns}$	1.4
反馈延迟时间 $\tau_{d,2}/\text{ns}$	2.4
相位 $\varphi_{2,1}, \varphi_{1,2}, \varphi_{p,1}, \varphi_{p,2}/\text{rad}$	0

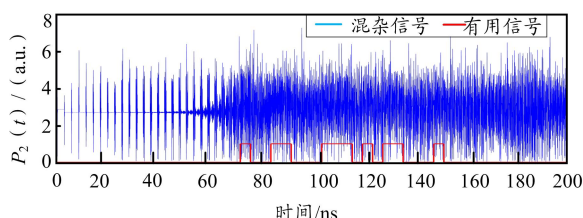
2 结果与分析

本文采用Matlab对Lang-Kobayashi速率方程进行仿真,得到SL产生信息的光功率轨迹图如图2所示,图中的 $P_1(t), P_2(t)$ 分别为混沌信息、混杂信息的光功率。可以看出:图2(a)中,产生的混沌信息在时域上毫无规律可循,其可以作为混沌载波携带所需要发送的有用信息;图2(b)中,由于有用信息的振幅比混沌载波小得多,可以很好地隐藏于混沌信息中^[5],因此从光功率图中无法清晰分辨出有用信息。

王飞,周雪芳:一种基于半导体激光器光混沌的双向通信系统



(a) 混沌信息



(b) 携带有用信息的混杂信息

图2 SL产生信息的光功率轨迹图

2.1 同步性分析

首先,本文通过对发射端与接收端的SL产生混沌信息的光功率做差运算,得到其同步误差为0,即 SL_1 与 SL_2 产生的混沌信息是完全同步的,其可以作为混沌载波传输有用信息,实现混沌同步^[6-7]。

然后,对携带有用信息的混杂信息的光功率作差处理,得到两端信息的同步误差,混杂信息的同步误差如图3所示。由于有用信息混杂在混沌信息中,此时的同步误差即为收发两端有用信息的光功率差值,监测同步误差,并与本地信息作差值运算,可以实现有用信息的解密。

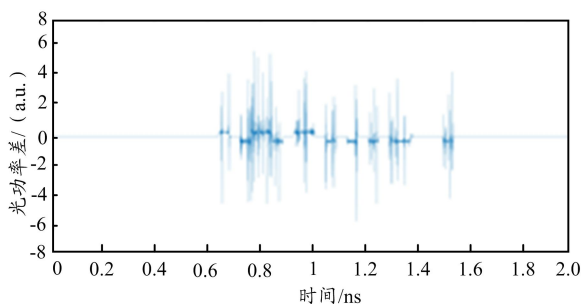
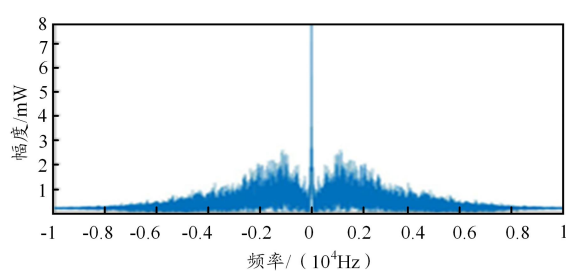


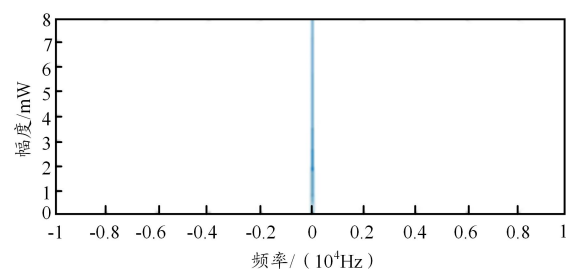
图3 混杂信息的同步误差

信息在传输过程中,一般都会受到噪声干扰,所以需要在接收端设置滤波器,对接收信息进行滤波。本文采用的滤波器为巴特沃斯滤波器,其截止频率为0.038 GHz,满足实验要求。

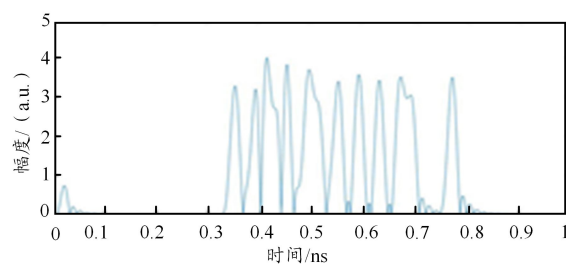
加密信息(包括混沌载波、通过调制偏置电流所得到的有用信息、传输过程中的噪声信息)的频谱图如图4(a)所示。可以看出,在频率为0 Hz附近,信息幅度较大的为混沌载波频谱,而其旁瓣幅值较小的则为有用信息。图4(b)为 SL_2 发送信息经过滤波后的频



(a) 加密信息频谱图



(b) SL_2 发送信息经滤波后的频谱图



(c) 传输信息解密后的有用信息频谱图

图4 滤波前后信息的同步误差频谱图

谱图,图中的旁瓣消失,表明滤波器起到了很好的滤波作用。图4(c)为传输信息解密后恢复的有用信息频谱图,信息波形较为光滑,恢复效果较好。由此可见,本文所提系统能实现同步通信。

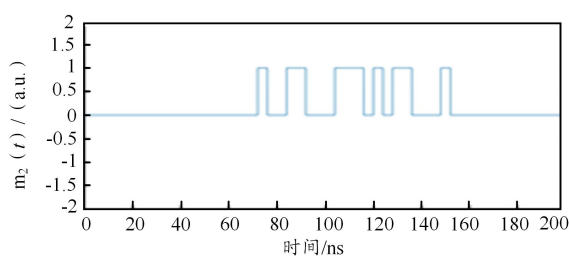
2.2 信息解密过程分析

本文以从 SL_2 到 SL_1 单方向传输信息为例,采用混沌键控方法,同时调制 SL_2 的偏置电流进行信息编码。设置2个独立的伪随机数字序列的振幅为0.12 mA,传输速率为1 Gb/s,传输带宽约为5.7 GHz^[5,8],得到从 SL_2 发出的有用信息的伪随机序列如图5所示。信息解密过程如下:

1)假设发射端 SL_2 发送信息为 $P_2(t)+m_2(t)$,接收端 SL_1 接收信息为 $P_1(t)+m_1(t)$,信息同步误差为 $P_1(t)-P_2(t+\Delta t)$ 。

2)在通信过程中,发射端和接收端所传输序列差异的绝对值为 $m_1(t)-m_2(t+\Delta t)$,再将同步误差与本地有用信息 $m_1(t)$ 进行相减,得到差值为 $P_1(t)-P_2(t+\Delta t)-m_1(t)$ 。

3)根据 $|P_1(t)-P_2(t+\Delta t)-m_1(t)|=|P_1(t)+m_1(t)-$

图5 SL_2 发送有用信息的伪随机序列

$P_2(t) - m_2(t) - m_1(t)$ 及 $P_1(t) = P_2(t)$, 可以恢复出有用编码信息 $m_2(t)$ 。因此, 在 SL_1 中通过以上的恢复运算, 可以得到 SL_2 所发送的有用信息, 即解密的信息。

仿真结果表明, 解密信息波形图与图5中 SL_2 伪随机序列 $m_2(t)$ 完全一致, 信号得以正确恢复。同理, 当从 SL_1 到 SL_2 方向传输信息时, 信号同样也能得到正确恢复^[9]。

2.3 鲁棒性分析

为了验证所提系统的鲁棒性^[10-11], 本文在 SL_1 引入一个方波扰动(在引入扰动前, 两端处于完全同步状态, 差值恒为0), 使发射端的反馈强度发生变化。仿真结果表明: 当发射端在 $t=200$ ns 时引入一个 15 ns 时长的扰动, 接收端直至 $t=200$ ns 时出现了一个与发射端同步的扰动并在 15 ns 后结束。这说明在引入外部扰动的情况下, 混沌动力学行为没有永久丧失同步性能, 证明该混沌通信系统具有一定的自我修复和抗干扰能力, 即鲁棒性较好。

3 结束语

本文设计了一种基于 SL 光混沌的双向通信系统, 该系统在信号传输过程中能同时实现保密和同步。在信息安全方面, 该系统两端发送的信息通过同一信道传输, 虽然窃听者能比较容易地获取同步误

差, 但由于没有本地信息密钥, 仍然无法恢复出传输的有用信息。本文下一步将探索采用复调制的方式将频率调制和振幅调制用于信号的编码中, 进一步增强混沌通信系统的安全性。

参考文献:

- [1] 赵耿, 锦清. 现代信息安全与混沌保密通信应用研究的进展[J]. 物理学进展, 2003, 23(2): 212-255.
- [2] 高泽超. 双向光电耦合半导体激光器混沌同步及其混沌保密通信的理论研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [3] VICENTE R, MIRASSO C R, FISCHER I. Simultaneous bidirectional message transmission in a chaos-based communication scheme [J]. Optics Letters, 2007, 32(4): 403-405.
- [4] LI Q, LU S S, BAO Q, et al. Simultaneously bidirectional transmission of message between three coupled semiconductor lasers[J]. Optics Communications, 2018, 423: 155-161.
- [5] LI Q L, LU S S, BAO Q, et al. Simultaneous trilateral communication based on three mutually coupled chaotic semiconductor lasers with optical feedback[J]. Applied Optics, 2018, 57(2): 251-257.
- [6] 邓伟. 双光反馈下垂直腔面发射激光器的双信道混沌同步通信[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [7] 操良平, 董晓云, 王泽钰, 等. 基于双光电反馈振荡器的单向混沌同步通信[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2014, 31(4): 126-130.
- [8] MORK J, TROMBORG B, MARK J. Chaos in semiconductor lasers with optical feedback: theory and experiment[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(1): 93-108.
- [9] COHEN A B, RAVOORI B, SORRENTINO F, et al. Dynamic synchronization of a time-evolving optical network of chaotic oscillators[J]. Chaos, 2010, 20(4): 043142-1-043142-9.
- [10] OHTSUBO J. Semiconductor Lasers: Stability, Instability and Chaos [M]. 3rd, New York: Springer, 2013.
- [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.