

# 基于耦合混沌半导体激光器之间双向信号传输的研究

李齐良, 卢珊珊, 包琪, 陈德望, 唐向宏, 胡淼, 曾然, 杨国伟

杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018

**摘要** 通过改变两个耦合混沌激光器反馈相位, 实现了两激光器之间信号的双向同步传输。两个激光器之间的部分透光的平面镜可以诱导延时和混沌动力学。数值模拟考虑延迟的激光器速率方程, 证明了两个激光器可以达到高质量同步。编解码的过程从信号改变两个激光器的反馈相位开始, 检测两个激光器中混沌载波光功率的差, 并与本地信号进行对比, 最终恢复发送者传输的数字信息。根据恢复出来信号的眼图, 可以看出该系统具有很高的传输质量。本方案中, 窃听者即使可以得到传输信号的差值, 也无法得知本地信号, 因此, 无法解调出发送者的信息, 系统的安全传输性能得以保障。

**关键词** 激光器; 混沌保密通信; 混沌同步; 双向传输

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0506001

## Bidirectional Signal Transmission Based on Two Coupled Chaotic Semiconductor Lasers

Li Qiliang, Lu Shanshan, Bao Qi, Chen Dewang, Tang Xianghong,  
Hu Miao, Zeng Ran, Yang Guowei

College of Telecommunication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

**Abstract** We change feedback phases of two coupled chaotic lasers to achieve bidirectional simultaneous transmission of signals between the two lasers. The partial transparent mirror between the lasers can induce delay and the chaotic dynamics. Numerical simulation of laser rate equation considering delay proves that the two lasers can achieve high-quality synchronization. The encoding and decoding process starts with the change of the feedback phases of the two lasers induced by signals. And then the difference in the optical power of the chaotic carrier in the two lasers is detected and compared with the difference with the local signal, finally, the digital messages sent by sender are recovered. Based on the eye diagram of recovered signal, it reveals that this system has a high transmission quality. In this scheme, the eavesdroppers cannot know the local signal even if he can get the difference of the transmitted signals. So the security of transmission performance of this system can be guaranteed as the eavesdroppers are unable to demodulate the sender's information.

**Key words** lasers; chaos secure communication; chaos synchronization; bidirectional transmission

**OCIS codes** 140.5960; 140.1540; 060.4510

## 1 引 言

近年来, 由于混沌在激光雷达、相干断层、神经网络、生物学、经济和安全通信等方面的诸多应用,

吸引了众多研究者的关注。混沌是具有内在确定性的类噪声随机过程, 其非周期、有界以及对初始条件的敏感性使其在通信传输方面具有极大的优点<sup>[1-2]</sup>。在一个利用混沌载波进行传输的安全通信系统中,

收稿日期: 2017-11-15; 收到修改稿日期: 2017-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(10904028, 11574068)、浙江省自然科学基金(Y111007)

作者简介: 卢珊珊(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事混沌通信、光通信及非线性光学方面的研究。

E-mail: 162080104@hdu.edu.cn

导师简介: 李齐良(1965—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事激光物理、光纤通信系统以及光信号传输方面的研究。

E-mail: liqiliang@sina.com

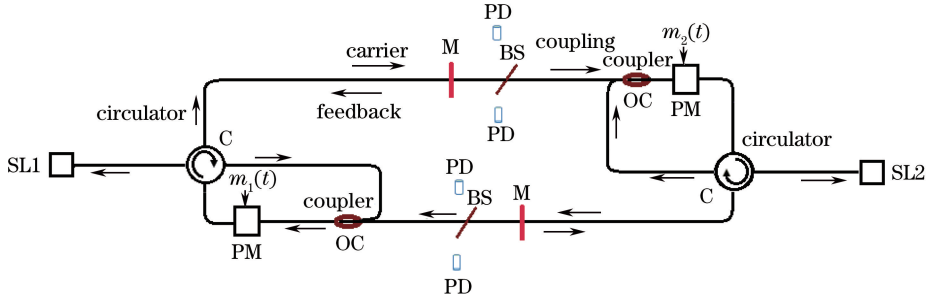
常常使用半导体激光器 (SL) 相互耦合增加其自由度来产生混沌信号<sup>[3-4]</sup>, 其最大的特征是利用混沌信号作为信号的载波, 由于混沌具有同步和稳健性的特征, 故可以实现传输信息的解码。在传输信号时, 发射机输出的混沌载波充当了传送信号的载体。由于信号的振幅远小于混沌载波的波动, 因此很难将信号从混沌载波中分离出来。具体地说, 为了实现信号解码, 发射机需要与接收机高度相似, 只有当接收机产生的混沌载波与发射机产生的混沌载波同步时才能通过监测接收机输出与输入的同步误差来恢复信号。因此, 混沌同步是实现整个混沌传输系统的关键<sup>[5-6]</sup>。基于 SLs 的双向混沌保密通信已经成为了研究的热点<sup>[7]</sup>。

本文通过同时调制两完全相同的半导体激光器的相位实现了信号的双向传输, 这两激光器中的阈值电流、光子/载流子衰减速率、线宽增强因子、微分增益因子以及饱和系数等均一致。参数相同是两束激光实现同步混沌载波的基础。在数值模拟中, 两

束激光先通过部分透光的平面镜相互耦合产生混沌动力, 完全同步后, 将需要传输的两个信号同步调制进入两个激光器的反馈相位中。最后, 通过监测接收机输出与输入之间的同步误差, 恢复传输信号。

## 2 理论模型

基于混沌的双向信息传输系统的体系结构如图 1 所示。它包含完全一致的两个激光器, 两束激光通过透射率相同的部分透光的平面镜发生耦合, 利用两路混沌信息之间的同步误差来恢复(解密)传输信号。模型中使用环形器(C)将本地激光器的输出信号传入部分透光的平面镜, 透过的光线部分通过光耦合器耦合到另一个激光器中, 而将反射回的反馈信号和对方的耦合信号作为输入信号, 输出以及输入信号分两个信道进行传输, 引入分束器(BS)将每个输出分成两部分。其中一部分被送入光电探测器(PD), 另一部分被发送到一个部分透光的平面镜(M)中。



SL: semiconductor laser; BS: beam splitter; M: partial transparent mirror;  $m(t)$ : transmission signal; C: circulator; PM: phase modulator; PD: photoelectric detector; OC: optical coupler

图 1 基于混沌的双向信息传输系统的示意图

Fig. 1 Schematic of chaos-based bidirectional signal transmission system

基于 Lang-Kobayashi 速率方程和文献[8-9]可知, 两个 SLs 的速率方程可以写成

$$\frac{dE_1}{dt} = i\Delta\omega_1 E_1 + \frac{1}{2}(1 + i\alpha)G(N_1, |E_1|^2)E_1 + \kappa_{2,1} \exp(i\varphi_{2,1})E_2(t - \tau_1 - \tau_2) + \kappa_{1,1} \exp(i\varphi_{1,1})E_1(t - 2\tau_1), \quad (1)$$

$$\frac{dE_2}{dt} = i\Delta\omega_2 E_2 + \frac{1}{2}(1 + i\alpha)G(N_2, |E_2|^2)E_2 + \kappa_{1,2} \exp(i\varphi_{1,2})E_1(t - \tau_2 - \tau_1) + \kappa_{2,2} \exp(i\varphi_{2,2})E_2(t - 2\tau_2), \quad (2)$$

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{I_i}{e} - \gamma_e N_i - [G(N_i, |E_i|^2) + \gamma]|E_i|^2, \quad (3)$$

$$G(N_i, |E_i|^2) = \frac{g(N_i - N_0)}{1 + s|E_i|^2} - \gamma, \quad (4)$$

式中:  $E_i(t)$  ( $i = 1, 2$ ) 为激光器产生的光场的复振幅;  $N_i$  为载流子数;  $N_0$  为透明的载流子数;  $|E_i|^2$  为光子数;  $G(N_i, |E_i|^2)$  为增益函数;  $\kappa, \kappa_i$  分别为耦合系数和反馈系数;  $\varphi_{i,j}$  为相位;  $\alpha$  为线宽增强因子;  $\tau_1, \tau_2$  为耦合和反馈的延迟时间;  $g$  为微分增益;  $I = 2.2 \times I_{th}$ , 为偏置电流, 其中  $I_{th}$  为阈值电流;  $s$  为饱和系数;  $\gamma, \gamma_e$  分别为光子衰减速率和载流子衰减速率;  $\Delta\omega_i$  为频率失谐量, 本文  $\Delta\omega_i$  为 0。在模型中, 在激光器连接路径上放置一个部分透光的平面镜(其反射和透射系数一致), 激光通过平面镜发生耦合。

因此, 在激光器中注入的光是反馈和耦合的总和, 为了保证同步性, 需要各自激光器的反馈耦合总和相等, 而且默认反馈的延迟时间和耦合时间远远大于激光的松弛振荡时间。定义相关系数来量化混沌同步的质量:

$$K_{ij}(\Delta t) = \frac{\langle [E_i(t) - \langle E_i(t) \rangle] \cdot [E_j(t - \Delta t) - \langle E_j(t - \Delta t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle |E_i(t) - \langle E_i(t) \rangle|^2 \rangle \cdot \langle |E_j(t - \Delta t) - \langle E_j(t - \Delta t) \rangle|^2 \rangle}}, \quad (5)$$

式中:  $i, j = 1, 2$ ;  $\langle \cdot \rangle$  为时间平均算符;  $K_{ij}(\Delta t)$  为两个 SLs 之间的位移相关系数。

### 3 同步性和稳健性分析

首先, 通过奇异吸引子的相图来确定系统是否能产生混沌载波, 然后利用同步图来说明两束激光之间的同步性是否存在, 最后通过调制相位来研究同步的稳健性。在该系统中, 若是耦合系数大, 反馈系数太小, 将会阻碍混沌载波的产生; 相反, 反馈系数大, 耦合系数过小将会影响同步的性能。因此, 有必要优化反馈以及耦合的参数。根据仿真, 得到了关于在不同的耦合系数和反馈系数下两束混沌载波的互相关系数, 如图 2 所示, 在图中, 选取了一个合适的点 A, 其耦合系数和反馈系数都为  $20 \text{ ns}^{-1}$ 。

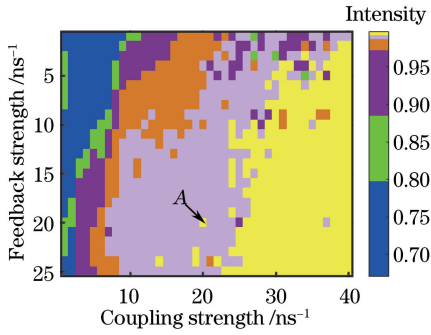


图 2 耦合-反馈系数平面的互相关系数  
Fig. 2 Cross-correlation coefficient in the coupling-feedback coefficients plane

结合实际的激光器, 再根据相关的文献[10], 选取其余参数, 如表 1 所示。

通过仿真得到各激光器相空间的吸引子图, 如图 3 所示, 吸引子的虚部和实部收敛于一个区域, 两束激光可以产生混沌载波。

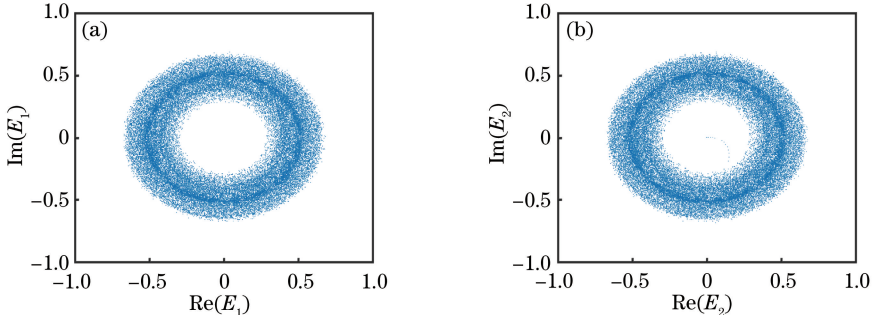


图 3 相空间中(a) SL1、(b) SL2 的吸引子图

Fig. 3 Diagram of attractors of (a) SL1 and (b) SL2 in phase space

表 1 实验所需参数值

Table 1 Parameter values used in simulation

Parameter	Value
Delay time $\tau_1, \tau_2 / \text{ns}$	1.4
Threshold current $I_{\text{th}} / \text{mA}$	17.3
Photon decay rate $\gamma / \text{ns}^{-1}$	496
Carrier decay rate $\gamma_e / \text{ns}^{-1}$	0.65
Differential gain $g / (10^2 \text{ ns}^{-1})$	1.2
Phase $\varphi_{i,j}$	0
Line width enhancement factor $\alpha$	3
Transparent carrier number $N_0 / 10^8$	1.25
Saturation coefficient $s / 10^7$	5
Feedback coefficient $\kappa_f / \text{ns}^{-1}$	20
Couple coefficient $\kappa_{i,j} / \text{ns}^{-1}$	20

假设 SL1 和 SL2 的初始光子数不同, 数值求解方程(1)~(4)式, 绘制了图 4 中 SL1、SL2 光功率  $P$  的时间轨迹图。可以发现, 激光功率均呈现混沌状态。在没有任何外部扰动的情况下, 这两束激光都在混沌的状态下运行, 可以清楚地看到, 这两束激光的时间轨迹非常相似。由于初始光子数不同, 因此忽略前 2 ns 的数值, 利用插入的互相关函数可以看出, 在  $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2 = 0 \text{ ns}$  处, 两束激光的互相关系数为 1, 表明 SL2 的信息与 SL1 的信息在 2 ns 之后可以实现同步。由图 5 也可以证明两束激光器光功率的同步性, 即使激光器的光子初始值不同, 但是激光器的同步误差也会趋于 0, 实现同步。

### 4 相移键控的双向信息传输

开关相移键控(OOPSK)方案应用于双向传输时, 需要对两束激光器输入端的反馈相位进行相应的调制<sup>[11-13]</sup>, 分别为  $\varphi_1, \varphi_2$ , 因此可以得到  $\varphi_{11} = \varphi_{21} = \varphi_1, \varphi_{22} = \varphi_{12} = \varphi_2$ 。当信号同时发送 0 或 1 时,

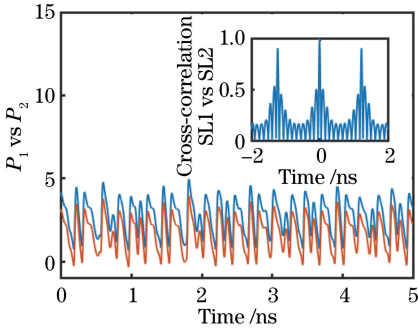


图 4 光功率的瞬时时间轨迹[SL2(红色)的轨迹垂直下移,以区别于 SL1(蓝色)],插入图为 SL1 和 SL2 两种激光输出之间的互相关函数

Fig. 4 Temporal traces of optical power of SL1 (blue), SL2 (red). Traces of SL2 have been shifted vertically to distinguish it from SL1. Insert shows the cross-correlation function between the two laser outputs

激光器之间的差异为 0,激光将保持同步;反之,两束激光将跳跃到非同步的动力学。

图 6(a)表示需要进行传输的信号,分别由两束激光同时进行编码和双向的传输;图 6(b)为信号的

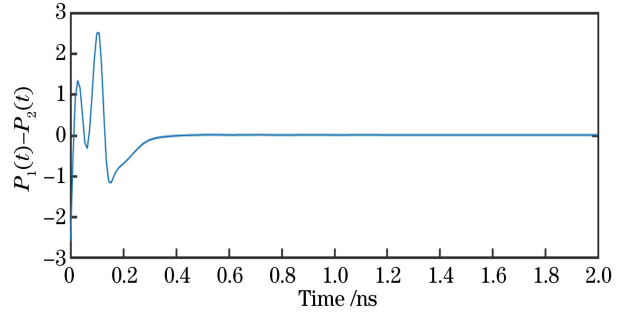
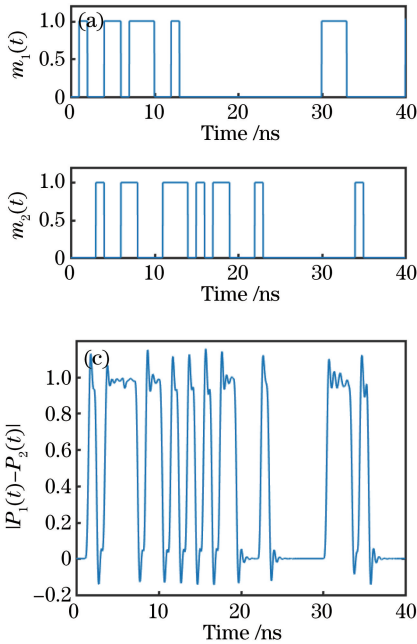


图 5 光功率的同步误差

Fig. 5 Synchronization error of optics power

差异值。混沌载波完全同步后,两个传输信号以  $1 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$  的速率同时调制两束激光的反馈相位,利用一个合适的滤波器,对同步误差进行整形,如图 6(c)所示。由 6(b)~(c)可知,其整形后的同步误差和传输信号的差异十分相似,可以通过同步误差解调出传输差值。图 6(d)展示了如何进行信息的解码,图 6(d)的上半部分的红线表示本地信号,而蓝线表示同步误差,利用公式  $|P_1(t) - P_2(t)| - m_1(t)$  即可解调出发射信号  $m_2(t)$ 。

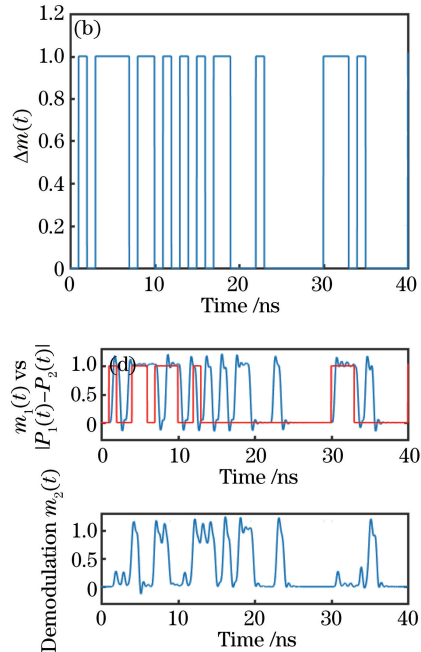


图 6 (a)两束激光的传输信号  $m_1(t)$  和  $m_2(t)$ ; (b)传输信号差异的绝对值  $\Delta m(t)$ ; (c)由巴特沃斯滤波器整形后的同步误差的绝对值  $|P_1(t) - P_2(t)|$ ; (d)通过  $|P_1(t) - P_2(t)|$  (blue) 和  $m_1(t)$  (red) 以及解码发送信号  $m_2(t)$

Fig. 6 (a) Transmission signal of two lasers; (b) absolute value of difference of two lasers  $\Delta m(t)$ ; (c) synchronization errors  $|P_1(t) - P_2(t)|$  shaped by Butterworth filter; (d) decoding by  $|P_1(t) - P_2(t)|$  (blue) and  $m_1(t)$  (red) to send signal  $m_2(t)$

绘制了解码信息之后的眼图,如图 7 所示,可以发现眼图完全张开,系统的解调性能良好。系统在传输过程中,窃听者可以很容易地监测到正在传输

的信息差异,但是没有本地的信号无法解调出传输的信号。因此,这就相当于接收方有一个密钥,这种技术可以保证通信的安全<sup>[10]</sup>。

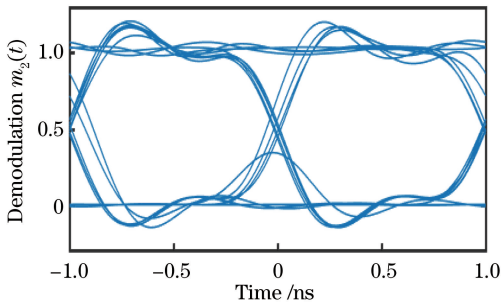


图 7 解码眼图

Fig. 7 Eye diagram of decoded signal

## 5 结 论

基于两束激光的延迟速率方程,研究了兩束激光的同步和稳健性。在没有外部扰动的情况下,即使是激光的初始值不一样,经过一段时间,激光器之间的同步误差也会趋于零,这意味着动力学的同步性是成立的。在设计中,每一个激光器不仅是一个发射机,而且是一个接收机,两种不同的信号都是通过同时调制两束激光的反馈相位进行加密。混沌的同步和稳健性表明:对于两个激光器,发送比特同时是 0 或 1,同步可以保持,相反,同步将会被打破。通过监测发射机与接收机之间的同步误差,并将误差与本地信号进行比较,解调出发送者的信号,信号的眼图说明系统可以实现高质量传输。在此方案中,窃听者可以监控同步误差,但无法获取本地发送的比特位,因此该系统可以保证双向通信的安全性。

## 参 考 文 献

[1] Donati S, Mirasso C R. Introduction to the feature section on optical chaos and applications to cryptography [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(9): 1138-1140.

[2] Heidari-Bateni G, McGillem C D, Tenorio M F. A novel multiple-address digital communication system using chaotic signals [C]. IEEE International Conference on Communications, 1992, 3(3): 1232-1236.

[3] Wang Y S, Zhao T, Wang A B, *et al.* Design and dynamic characteristics of an external-cavity semiconductor laser generating wide bandwidth chaos [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 111401.

王永胜, 赵彤, 王安帮, 等. 一种可产生高带宽混沌

的外腔半导体激光器的设计及其动态特性[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 111401.

[4] Zhang X X, Wu T A, Chang K G, *et al.* Time-delay characteristic and bandwidth analysis of chaotic output from single-ended feedback and mutually coupled vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0501010.

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): 0501010.

[5] Li Q, Deng T, Wu Z M, *et al.* Security-enhanced bidirectional long-distance chaos secure communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0106001.

李琼, 邓涛, 吴正茂, 等. 安全性增强的双向长距离混沌保密通信[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0106001.

[6] Uchida A, Rogister F, García-Ojalvo J, *et al.* Synchronization and communication with chaotic laser systems[J]. Progress in Optics, 2005, 48: 203-341.

[7] Rahman L, Li G F, Tian F. Remote synchronization of high-frequency chaotic signals in semiconductor lasers for secure communications [J]. Optics Communications, 1997, 138(1/2/3): 91-94.

[8] 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.

[9] Mulet J, Masoller C, Mirasso C R. Modeling bidirectionally coupled single-mode semiconductor lasers[J]. Physical Review A, 2002, 65(6): 063815.

[10] 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.

[11] Ho M C, Hung Y C, Chou C H. Phase and anti-phase synchronization of two chaotic systems by using active control [J]. Physics Letters A, 2002, 296(1): 43-48.

[12] Goto S I, Davis P, Yoshimura K, *et al.* Synchronization of chaotic semiconductor lasers by optical injection with random phase modulation[J]. Optical & Quantum Electronics, 2009, 41(3): 137-149.

[13] Kurdoglyan M S, Kim C M, Kim G U. Effects of nonlinear self-phase modulation of the transmitted signal on synchronization behavior of chaotic semiconductor lasers [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2004, 21(12): 2107-2111.