

利用耦合时延增强激光混沌系统安全性能研究

张 巧 潘 炜 李念强 江 宁 项水英

(西南交通大学信息科学与技术学院, 四川 成都 610031)

摘要 安全性是混沌通信中的重要问题。基于一个外光反馈半导体激光器驱动两个互耦合激光器的混沌通信系统,研究激光混沌系统中反馈时延与耦合时延特征,并应用龙格-库塔法进行动态仿真。重点分析了当调节一些可控参数(耦合时延和驱动强度)时,能够改变两耦合激光器输出自相关函数中反馈时延和耦合时延幅值的差异,以此掩藏反馈时延,从而得出更优载波。仿真结果说明利用耦合时延可以增强激光混沌系统的安全性。最后给出了在优化载波后系统同步质量的讨论。

关键词 光通信;激光混沌系统;耦合时延;驱动强度;安全性;时延隐藏

中图分类号 TN248.4; TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0102009

Investigation on Security Enhancement of Chaotic Optical Communication Systems via Coupling Delay

Zhang Qiao Pan Wei Li Nianqiang Jiang Ning Xiang Shuiying

(School of Information Science & Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract The security issue is of vital importance in chaos-based communications. The characteristics of feedback delay and coupling delay in chaotic optical communication systems has been numerically studied, based on a chaos-based communication system composed of two mutually coupled semiconductor lasers driven by an external cavity semiconductor laser. Numerical simulation of the model is established with the Runge-Kutta method. The emphasis has been devoted to the following analysis: by adjusting some controllable parameters (coupling delay and injection strength), one can reasonably change the discrepancy between the amplitudes of feedback delay and coupling delay in autocorrelation function for the mutually coupled semiconductor lasers output. For this reason, the feedback delay is effectively concealed, and thus a better chaotic carrier can be obtained. More importantly, our numerical results demonstrate that the coupling delay is able to be employed to improve the security of chaotic optical communication systems. Finally, the discussion of synchronization quality of the dedicated system, under the optimized chaotic carrier circumstance, is given.

Key words optical communications; chaotic optical communication system; coupling delay; injection strength; security; time delay concealment

OCIS codes 140.5965; 140.1540; 060.4785

1 引 言

自从 1990 年起, Pecora 等^[1]提出混沌同步,并在实验室中观察到两个混沌电路的同步,国内外掀起了混沌同步的研究热潮,利用混沌和混沌同步实现保密通信已成为近年来重要的研究领域之一。在

激光混沌通信中,可以利用半导体激光器、固体激光器以及光纤激光器等作为混沌光源^[2~25]。其中,半导体激光器由于可以利用外光反馈、光电反馈、光注入等方法实现混沌输出,同时具有高调制带宽和便于封装等诸多优点,已经成为时下研究的热

收稿日期: 2011-08-22; **收到修改稿日期**: 2011-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(60976039)和四川省基础研究项目(2011JY0030)资助课题。

作者简介: 张 巧(1987—),女,硕士研究生,主要从事半导体激光器和光通信等方面的研究。

E-mail: zhangqiao421@163.com

导师简介: 潘 炜(1959—),男,博士,教授,主要从事半导体激光器和光通信等方面的研究。

E-mail: weipan80@sina.com

点^[3~11]。

目前,由于互耦合半导体激光器在混沌保密通信方面的潜在应用,关于互耦合激光器系统的研究备受关注^[12~20]。Heil等^[13]分析了对称时延耦合半导体激光器的混沌同步和自发对称破坏。Yanchuk等^[15]研究了小注入延时条件下半导体激光器互耦合同步,通过研究系统参数之间的影响,分析了同步的存在条件,从而实现耦合同步。这为以后的多耦合激光器混沌同步打下了基础。同时,M. Chiang等^[16]在理论和实验上演示了光电反馈的互耦合半导体激光器的同步情况。即便如此,利用互耦合半导体激光器增强混沌系统安全性的研究微乎其微,因此对此系统或其改进系统安全性方面的进一步研究是至关重要的。

对于保密通信系统来说,安全性始终是重要的关注对象。近年来,学者们逐步从混沌系统的安全性等方面展开研究,其安全性主要取决于能否阻止窃听者获取通信系统的基本参数。因此,混沌系统参数的隐蔽性非常重要。目前,很多系统通过引入时延来产生高维混沌,因此时延特征则成为威胁系统安全性的重要因素。关于时延的确定方法有很多,如常用的自相关、互信息、排列熵以及符号时间序列与优化结合的方法^[21~23]。Rontani等^[21]通过分析强度时间序列,讨论了外光反馈半导体激光器提取反馈时延的可能性,并给出了在一定程度上能掩藏时延的方法;Wu等^[22]通过实验和数值仿真同时论证了利用双反馈抑制半导体激光器混沌输出的时延特性的可行性;Li等^[23]引入符号时间序列分析方法,从优化的角度,探索性地证明了在激光混沌系统中同时提取反馈时延和反馈强度的可能,并与现有的自相关和互信息技术比较,分析了各自的优势以及不足,从而说明以上方法在时延提取研究中的互补特性。

本文根据以上研究,针对一个外光反馈半导体激光器驱动两个互耦合激光器的混沌综合系统,建立相应的速率方程模型。通过改变耦合时延和驱动强度,探讨互耦合激光器混沌信号的时间延迟特性,分析激光混沌通信系统的安全性。首先,在不同的驱动强度下,以耦合时延作为变量,分析了耦合激光器的自相关函数,研究了反馈时延和耦合时延的幅值差异;其次,针对特定耦合时延值,以驱动强度作为变量,进一步分析了反馈时延和耦合时延的幅值差异,得出了更优载波;最后,探讨了该混沌系统的同步质量。

2 系统模型及数学描述

图1为安全性增强的混沌综合系统结构^[25],该系统主要由两个互耦合半导体激光器SL1和SL2以及一个外光反馈半导体激光器SL3组成。SL3经外腔镜(EM)反馈产生混沌信号,通过全反射镜(M)等同地单向注入到耦合激光器SL1和SL2,使二者达到混沌同步。因此,在该对称工作条件下,SL1和SL2的动态特性由它们的互耦合机制与SL3的注入共同决定。

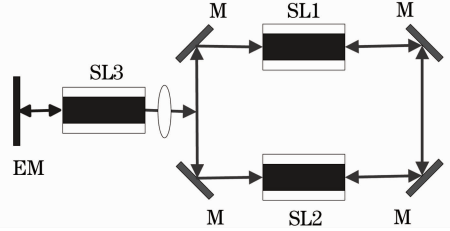


图1 外光反馈半导体激光器驱动互耦合激光器的混沌综合系统结构

Fig. 1 Chaos-based communication system composed of two mutually coupled semiconductor lasers driven by an external cavity semiconductor laser

半导体激光器是一个复杂的非线性系统,其动态行为可用著名的Lang-Kobayashi方程来描述。在此综合系统中,可通过拓展此基本方程进行数学建模,从而调节所关心的可控参数研究其对此系统安全性的影响,具体的速率方程为^[19]

耦合激光器:

$$\dot{E}_m(t) = \frac{1}{2}(1 + j\alpha) \left(G_m - \frac{1}{\tau_p} \right) E_m(t) + k_{i,m} E_i(t - \tau_{i,m}) \exp(-j\omega_0 \tau_{i,m}), \quad (1)$$

$$\dot{N}_m(t) = \frac{I}{e} - \frac{N_m(t)}{\tau_c} - G_m |E_m(t)|^2, \quad (2)$$

驱动激光器(外光反馈半导体激光器):

$$\dot{E}_n(t) = \frac{1}{2}(1 + j\alpha) \left(G_n - \frac{1}{\tau_p} \right) E_n(t) + k_n E_n(t - \tau_n) \exp(-j\omega_0 \tau_n), \quad (3)$$

$$\dot{N}_n(t) = \frac{I}{e} - \frac{N_n(t)}{\tau_c} - G_n |E_n(t)|^2, \quad (4)$$

式中 $G_{m(n)}(t) = g[N_{m(n)}(t) - N_0]/(1 + \epsilon |E_{m(n)}(t)|^2)$ 为光增益($m = 1$ 或 $2, n = 3, i = 1, 2$ 和 3 且 $i \neq m$); $E(t)$ 为缓慢变化的复数电场幅值; $N(t)$ 为有源区内载流子数; $\epsilon = 1 \times 10^{-7} \text{ ns}^{-1}$ 为增益饱和系数; $N_0 = 1.5 \times 10^8$ 为有源区中透明载流子数; ω_0 为激光器的角频率(这里相位取为 0); $\alpha = 5$ 为线宽因子; $\tau_c = 1 \text{ ns}$ 为载流子寿命; $\tau_p = 1 \text{ ps}$ 为光子寿命; $g = 1.5 \times 10^4$ 为线宽因子; $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ 为电子电荷; $I =$

37 mA为注入电流; $k_{12} = k_{21} = 40 \text{ ns}^{-1}$ 为耦合强度; $k_3 = 20 \text{ ns}^{-1}$ 为反馈强度; $k_{31} = k_{32}$ 为驱动强度; $\tau_{12} = \tau_{21}$ 为耦合时延; $\tau_{31} = \tau_{32} = 0$ 为驱动时延; $\tau_3 = 1 \text{ ns}$ 为反馈时延^[19]。

特别地,为了定性分析混沌载波的优劣和定量刻画通信系统的同步质量,本文主要采用自相关函数和互相关函数进行度量分析。通过混沌载波的自相关函数演变,能够得出其中的一些特征时延,如常关注的反馈时延;互相关函数能够有效地表征两混沌信号的同步质量,因此被广泛应用。为处理方便,可将它们定义为^[21,23]

$$\rho_{12}(\Delta t) = \frac{\langle [I_1(t - \Delta t) - \langle I_1(t - \Delta t) \rangle][I_2(t) - \langle I_2(t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [I_1(t - \Delta t) - \langle I_1(t - \Delta t) \rangle]^2 \rangle \langle [I_2(t) - \langle I_2(t) \rangle]^2 \rangle}}, \quad (5)$$

$$C(\theta) = \frac{\langle [I(t + \theta) - \langle I(t + \theta) \rangle][I(t) - \langle I(t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [I(t) - \langle I(t) \rangle]^2 \rangle \langle [I(t + \theta) - \langle I(t + \theta) \rangle]^2 \rangle}}, \quad (6)$$

式中 $\rho_{12}(\Delta t)$ 和 $C(\theta)$ 分别为互相关和自相关函数, $\langle \cdot \rangle$ 表示时间平均, $I(t) = |E(t)|^2$ 为强度时间序列, Δt 为时移, $I(t + \theta)$ 是相对于 $I(t)$ 时移了 θ 的强度时间序列。

3 仿真结果及讨论

基于以上所给参数,速率方程(1)~(4)可以利用四阶龙格-库塔法进行积分。由于SL1与SL2接收来自SL3相同的注入,即满足对称工作条件,因此这里重点分析激光器SL1。通过数值仿真,发现通过改变一些可控参数,SL1混沌输出的自相关函数中反馈时延和耦合时延的幅值可表现出不同大小关系,这在一定程度上能够弱化甚至掩藏激光混沌载波中的时延特性。为方便阐述,可令反馈时延和耦合时延幅值分别为 A_1 和 A_2 。

在仿真中,驱动强度与耦合强度,以及耦合时延与反馈时延间的大小关系是研究的重点。首先当驱动强度小于耦合强度时,固定反馈时延为1 ns,通过改变耦合时延,观察 A_1 和 A_2 在SL1输出自相关函数中的变化规律。

图2和图3分别为 $k_{31} = k_{32} = 20 \text{ ns}^{-1}$ 和 $k_{31} = k_{32} = 30 \text{ ns}^{-1}$ 的仿真结果,其中耦合强度 $k_{12} = k_{21} = 40 \text{ ns}^{-1}$ 固定不变。易知,上述两种情况可以得到一致的结果,即:当耦合时延小于反馈时延时, $A_1 \approx A_2$,或者说难以区分两个时延;而当耦合时延增加到一个临界值并继续增大的过程中, $A_1 < A_2$,这时

耦合时延处的峰值很容易被人误认为是反馈时延。值得注意的是,当耦合时延小于1 ns时, A_1 与 A_2 都很小(数量级约0.05),因此很难从输出混沌时间序列中得到反馈时延和耦合时延的值,则将此作为混沌载波在一定程度上可以提高激光混沌系统的安全性。其物理原因可以解释为,SL1(SL2)具有两个自由度的外光引入,其一是具有反馈时延的SL3的注入,另一是来自SL2(SL1)的互注入。这两个时延信息在SL1中都是不可忽略的,其实可以理解为SL1具有两个反馈腔,通过改变耦合时延是可以抑制或者消除上面提到的两类时延的。以上结论在一定程度上与文献[22]相一致。

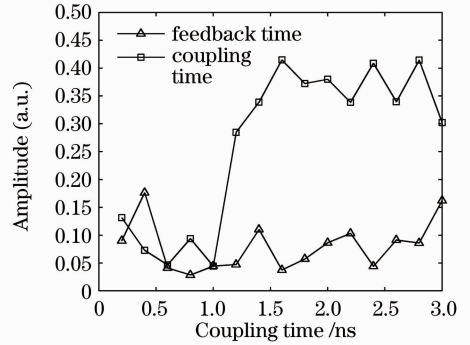


图2 当 $k_{31} = k_{32} = 20 \text{ ns}^{-1}$ 时,SL1的自相关函数反馈时延和耦合时延的幅值

Fig. 2 Amplitudes of feedback delay and coupling delay in autocorrelation function for the output of SL1 under the condition that $k_{31} = k_{32} = 20 \text{ ns}^{-1}$

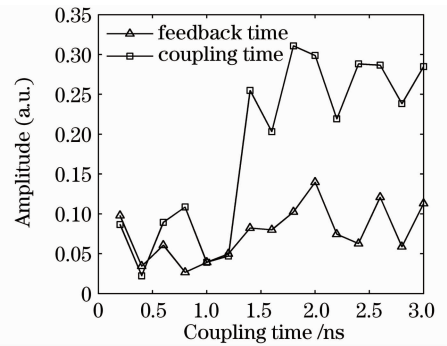


图3 当 $k_{31} = k_{32} = 30 \text{ ns}^{-1}$ 时,SL1的自相关函数反馈时延和耦合时延的幅值

Fig. 3 Amplitudes of feedback delay and coupling delay in autocorrelation function for the output of SL1 under the condition that $k_{31} = k_{32} = 30 \text{ ns}^{-1}$

而当驱动强度等于耦合强度($k_{31} = k_{32} = 40 \text{ ns}^{-1}$)时,从图4仿真结果可看出,耦合时延等于反馈时延(1 ns)是其临界值。当耦合时延 $\tau_{12} = \tau_{21} < 1 \text{ ns}$ 时, $A_1 > A_2$,反馈时延容易被区分;而当耦合时延 $\tau_{12} = \tau_{21} > 1 \text{ ns}$ 时, $A_1 < A_2$,这时耦合时延

处的峰值容易被人误认为是反馈时延。

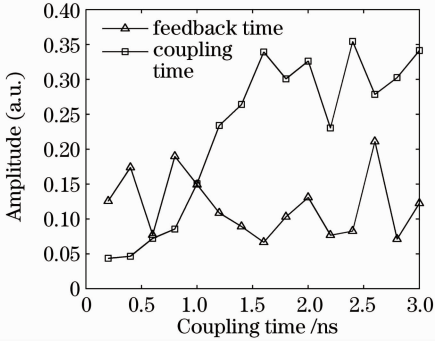


图 4 当 $k_{31}=k_{32}=40 \text{ ns}^{-1}$ 时, SL1 的自相关函数反馈时延和耦合时延的幅值

Fig. 4 Amplitudes of feedback delay and coupling delay in autocorrelation function for the output of SL1 under the condition that $k_{31}=k_{32}=40 \text{ ns}^{-1}$

同样,对驱动强度大于耦合强度时也进行数值仿真。图 5 和图 6 分别为 $k_{31}=k_{32}=50 \text{ ns}^{-1}$ 和 $k_{31}=k_{32}=60 \text{ ns}^{-1}$ 的仿真结果。由图 5 可知,当驱动强度接近耦合强度时,耦合时延 $\tau_{12}=\tau_{21}<1 \text{ ns}$, $A1>A2$, 反馈时延容易被区分;而耦合时延 $\tau_{12}=\tau_{21}>1 \text{ ns}$ 时, $A1<A2$, 耦合时延处的峰值容易被误认为是反馈时延,使反馈时延能得到很好的隐藏。然而,随着驱动强度继续增大,如图 6 所示,耦合时延除了 $1 \text{ ns}<\tau_{12}=\tau_{21}<1.4 \text{ ns}$ 和 $2.5 \text{ ns}<\tau_{12}=\tau_{21}\leq 3 \text{ ns}$ 处有 $A1<A2$, 耦合时延的峰值可以被误以为是反馈时延的值。其他耦合时延处,均为 $A1>A2$, 从而反馈时延容易被提取。

出现以上仿真结果其主要原因可以观察(1)~(4)得出:耦合时延峰值随着耦合时延的增大成指数衰减,即 $k_{21}E_2(t-\tau_{21})$ (这里相位为 0), 而反馈时延峰值却随着驱动强度的增加成直线上升,即

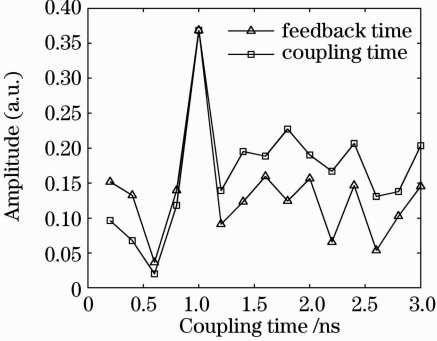


图 5 当 $k_{31}=k_{32}=50 \text{ ns}^{-1}$ 时, SL1 的自相关函数反馈时延和耦合时延的幅值

Fig. 5 Amplitudes of feedback delay and coupling delay in autocorrelation function for the output of SL1 under the condition that $k_{31}=k_{32}=50 \text{ ns}^{-1}$

$k_{31}E_3(t-\tau_{31})$ 。

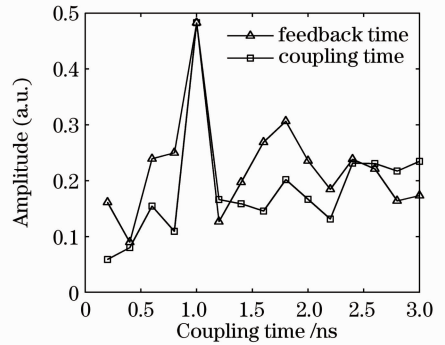


图 6 当 $k_{31}=k_{32}=60 \text{ ns}^{-1}$ 时, SL1 的自相关函数反馈时延和耦合时延的幅值

Fig. 6 Amplitudes of feedback delay and coupling delay in autocorrelation function for the output of SL1 under the condition that $k_{31}=k_{32}=60 \text{ ns}^{-1}$

为进一步分析讨论,根据以上结果,取不同的耦合时延,通过仿真来观察 SL1 自相关函数的变化情况。从图 7(a),(b)中可看出,耦合时延 $\tau_{12}=\tau_{21}=1.2 \text{ ns}$ 或 $\tau_{12}=\tau_{21}=1.3 \text{ ns}$ 时,从自相关函数中很难区分反馈时延,从而能使反馈时延得到很好的隐藏;然而,随着耦合时延的增大,图 7(c),(d)中,当耦合时延 $\tau_{12}=\tau_{21}=2.6 \text{ ns}$ 或 $\tau_{12}=\tau_{21}=3.0 \text{ ns}$ 时,不仅耦合时延处有明显的峰值,反馈时延 τ_3 处也同样存在明显的峰值。因此,以耦合时延 $\tau_{12}=\tau_{21}=1.2 \text{ ns}$ 或 $\tau_{12}=\tau_{21}=1.3 \text{ ns}$ 作为载波的耦合时延比较理想。这里,对图 7(a),(b)进行直观比较,选取耦合时延 $\tau_{12}=\tau_{21}=1.3 \text{ ns}$ 作为载波的耦合时延更优。

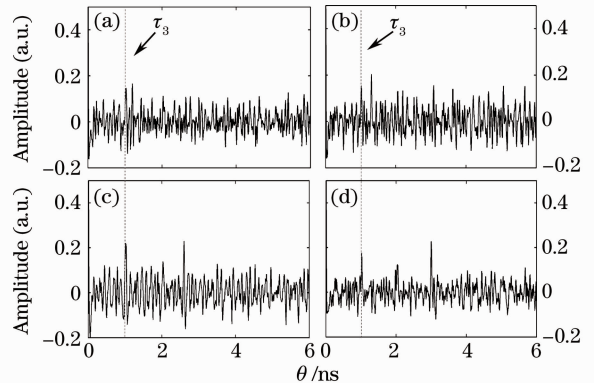


图 7 当 $k_{31}=k_{32}=60 \text{ ns}^{-1}$ 时, SL1 的自相关函数。(a) $\tau_{12}=\tau_{21}=1.2 \text{ ns}$; (b) $\tau_{12}=\tau_{21}=1.3 \text{ ns}$; (c) $\tau_{12}=\tau_{21}=2.6 \text{ ns}$; (d) $\tau_{12}=\tau_{21}=3.0 \text{ ns}$

Fig. 7 Autocorrelation function for the output of SL1 under the condition that $k_{31}=k_{32}=60 \text{ ns}^{-1}$. (a) $\tau_{12}=\tau_{21}=1.2 \text{ ns}$; (b) $\tau_{12}=\tau_{21}=1.3 \text{ ns}$; (c) $\tau_{12}=\tau_{21}=2.6 \text{ ns}$; (d) $\tau_{12}=\tau_{21}=3.0 \text{ ns}$

通过以上仿真可知,在不同的驱动强度下,改变耦合时延,可观察到自相关函数中反馈时延和耦合时延幅值的变化规律。在此,取耦合时延 $\tau_{12} = \tau_{21} = 1.3 \text{ ns}$,通过改变驱动强度进行仿真,从图 8 易知,当驱动强度 $k_{31} = k_{32} \leq 60 \text{ ns}^{-1}$, $A_1 < A_2$,耦合时延处的峰值容易被误认为是反馈时延,则反馈时延能很好地被隐藏;而 $k_{31} = k_{32} > 60 \text{ ns}^{-1}$ 时, $A_1 > A_2$,随着驱动强度的不断增加,反馈时延峰值越明显,也就意味着反馈时延越容易被窃听者提取。

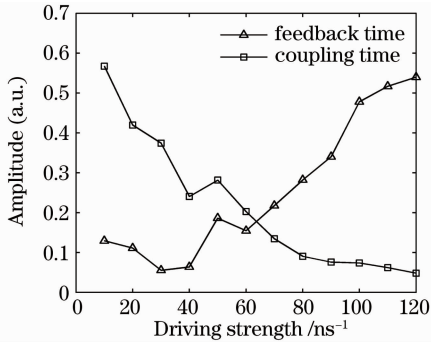


图 8 当 $\tau_{12} = \tau_{21} = 1.3 \text{ ns}$ 时,SL1 的自相关函数反馈时延和耦合时延的幅值

Fig. 8 Amplitudes of feedback delay and coupling delay in autocorrelation function for the output of SL1 under the condition that $\tau_{12} = \tau_{21} = 1.3 \text{ ns}$

从以上结论可得:通过改变一些可控参数(耦合时延和驱动强度),可以调节自相关函数中反馈时延和耦合时延的幅值大小。在保密情况下,窃听者是不会知道用了什么系统的。利用常规的自相关函数分析方法所得出的峰值,可能是耦合时延,而窃听者却误认为是反馈时延,从而使反馈时延得到了很好的保护。这在一定程度上也就阻止了一类通过时间序列分析以及相空间重构的攻击者。

另外,本文重点分析了调节耦合时延与驱动强度对时延掩藏的影响,其实可以进一步分析耦合强度对时延掩藏的影响。如在文献[25]中已经实验证明了,在互注入激光混沌系统中,通过调节耦合强度,是可以消除时延信息的。因此为避免重复,在此研究中,没有展开分析耦合强度的影响。值得进一步论证的是通过调节耦合时延和耦合强度,选择合理的参数,所提出的混沌综合系统中涉及的时延信息是可以完全被抑制的。

由于文献[19]中已指出,外光反馈半导体激光器驱动互耦合激光器混沌综合系统时,当耦合强度确定,驱动强度越大,同步质量越好。这里取 $k_{31} = k_{32} = 60 \text{ ns}^{-1}$,由图 9 可知二者之间的同步质量非常

好,此时为载波更优。

同理,用类似的方法可以得出 SL2 也能很好地抑制或隐藏反馈时延。因此,选择 SL1 或 SL2 作为发送端,进行混沌保密通信具有更高的安全性。

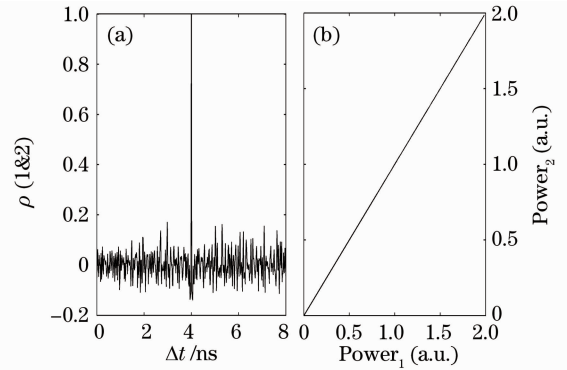


图 9 SL1 和 SL2 的互相关和相关曲线。(a)互相关; (b)相关曲线

Fig. 9 Cross-correlation and correlation curves of SL1 and SL2. (a) Cross-correlation; (b) correlation curve

4 结 论

针对一个外光反馈半导体激光器驱动两个互耦合激光器的混沌综合系统结构,建立了相应的动力学行为速率方程,研究了耦合时延和驱动强度对系统安全性的影响。通过调节可控参数(耦合时延和驱动强度)研究时延特征,分析了自相关函数中反馈时延和耦合时延的幅值变化规律。结果表明,改变耦合时延和驱动强度均能在一定程度上较好地隐藏反馈延迟,从而得到更优载波,并且系统同步质量良好。因此,利用耦合时延可以增强激光混沌系统的安全性。

参 考 文 献

- 1 L. M. Pecora, T. L. Carroll. Synchronization in chaotic systems [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(8): 821~825
- 2 L. G. Luo, P. L. Chu, T. Whitbread. Experimental observation of synchronization of chaos in erbium-doped fiber lasers[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **176**(15): 213~217
- 3 Gao Xiaoming, Zhang Weijun, Han Yanong. Chaotic dynamics of semiconductor laser with phase conjugation feedback[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 1998, **15**(3): 253~258
高晓明, 张为俊, 韩亚农. 相位共轭反馈半导体激光器混沌动力学[J]. *量子电子学报*, 1998, **15**(3): 253~258
- 4 Deng Guo, Pan Wei, Luo Bin. Influence of spontaneous emission factor on the bifurcation and chaos behavior of VCSEL under large signal modulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3): 293~296
邓果, 潘伟, 罗斌. 自发辐射因子对 VCSEL 在大信号调制下的分岔及混沌行为的影响[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 293~296
- 5 Li Xiaofeng, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Theoretical study on nonlinear dynamics of vertical-cavity-surface-emitting laser with

- multiple external optical feedbacks[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1450~1454
- 李孝峰, 潘 炜, 罗 斌等. 多次外光反馈下垂直腔面发射激光器非线性动态特性理论研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1450~1454
- 6 A. Argyris, D. Syvridis, L. Larger *et al.*. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links[J]. *Nature*, 2005, **438**(7066): 343~346
- 7 Zhang Weili, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Theoretical analysis on dynamics and bifurcations characteristics of VCSELs with phase conjugate optical feedback[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5): 632~636
- 张伟利, 潘 炜, 罗 斌等. 相位共轭反馈下垂直腔面发射激光器动态分岔特性的理论研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5): 632~636
- 8 D. Rontani, A. Locquet, M. Sciamanna *et al.*. Time-delay identification in a chaotic semiconductor laser with optical feedback: a dynamical point of view[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2009, **45**(7): 879~891
- 9 Cao Liangping, Deng Tao, Lin Xiaodong *et al.*. Investigation on nonlinear dynamic behaviors of the distributed feedback semiconductor laser subjected to optical feedback[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 939~943
- 操良平, 邓 涛, 林晓东等. 光反馈分布反馈半导体激光器的非线性动力学动态行为[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 939~943
- 10 Zhang Mingjiang, Liu Tiegeng, Zheng Jianyu *et al.*. Demonstration of ultrawideband chaotic signal generating utilizing external feedback laser diode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0405002
- 张明江, 刘铁根, 郑建宇等. 利用光反馈半导体激光器产生超宽带混沌脉冲信号[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0405002
- 11 Zhang Shenghai, Tan Jianfeng, Yang Hua *et al.*. Chaos driving synchronization of vertical cavity surface emitting lasers with optical feedback[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0402013
- 张胜海, 谭建锋, 杨 华等. 光反馈垂直腔面发射半导体激光器的混沌驱动同步[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0402013
- 12 F. R. Oliveras, M. C. Soriano, P. Colet *et al.*. Information encoding and decoding using unidirectionally coupled chaotic semiconductor lasers subject to filtered optical feedback [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2009, **45**(8): 962~968
- 13 T. Heil, I. Fischer, W. Elsasser *et al.*. Chaos synchronization and spontaneous symmetry-breaking in symmetrically delay-coupled semiconductor lasers[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**(5): 795~798
- 14 Yan Senlin, Chi Zeying, Chen Wenjian *et al.*. Chaotic synchronization with coupling lasers and its application for secure communications [J]. *J. China Institute of Communications*, 2004, **25**(1): 78~86
- 颜森林, 迟泽英, 陈文建等. 激光混沌耦合同步及其在保密通信中的应用[J]. *通信学报*, 2004, **25**(1): 78~86
- 15 S. Yanchuk, K. R. Schneider, L. Recke. Dynamics of two mutually coupled semiconductor lasers: instantaneous coupling limit[J]. *Phys. Rev. E.*, 2004, **69**(5): 056221
- 16 M. C. Chiang, H. F. Chen, J. M. Liu. Experimental synchronization of mutually coupled semiconductor lasers with optoelectronic feedback[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(11): 1333~1340
- 17 I. B. Schwartz, L. B. Shaw. Isochronal synchronization of delay-coupled systems[J]. *Phys. Rev. E.*, 2007, **75**(4): 046207
- 18 R. Vicente, I. Fischer, C. R. Mirasso. Synchronization properties of three-coupled semiconductor lasers[J]. *Phys. Rev. E.*, 2008, **78**(6): 066202
- 19 N. Jiang, W. Pan, L. Y. Yan *et al.*. Properties of leader-laggard chaos synchronization in mutually coupled external-cavity semiconductor lasers[J]. *Phys. Rev. E.*, 2010, **81**(6): 066217
- 20 J. J. Hu, J. S. Ma, J. Z. Lin. Chaos synchronization and communication of mutual coupling lasers ring based on incoherent injection[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2010, **121**(24): 2227~2229
- 21 D. Rontani, A. Locquet, M. Sciamanna *et al.*. Loss of time-delay signature in the chaotic output of a semiconductor laser[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(20): 2960~2962
- 22 J. G. Wu, G. Q. Xia, Z. M. Wu. Suppression of time delay signatures of chaotic output in a semiconductor laser with double optical feedback [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(22): 20124~20133
- 23 N. Q. Li, W. Pan, L. Y. Yan *et al.*. On joint identification of the feedback parameters for hyperchaotic systems: an optimization-based approach [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2011, **44**(4): 198~207
- 24 B. B. Zhou, R. Roy. Isochronal synchrony and bidirectional communication with delay-coupled nonlinear oscillator[J]. *Phys. Rev. E.*, 2007, **75**(2): 026205
- 25 J. G. Wu, Z. M. Wu, X. Tang *et al.*. Simultaneous generation of two sets of time delay signature eliminated chaotic signals by using mutually coupled semiconductor lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(12): 759~761

栏目编辑: 宋梅梅