

基于互耦半导体激光器的混沌网状网络的同步与通信

潘兴茂 吴正茂 唐曦 夏光琼

(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

摘要 提出了一个由四个半导体激光器通过相互耦合构成的混沌网状网络系统,研究了这种拓扑结构下各激光器的动力学行为、任意两个激光器之间的混沌同步特性以及参数失配对同步性能的影响,并对该系统的保密通信性能进行了分析。理论仿真结果表明,网状网络系统中各激光器在合适的相互耦合条件下均可呈现混沌输出,四个激光器输出的混沌信号可达到整体同步(即所有混沌信号之间都同步)或部分同步。基于该网络的混沌同步,可实现多用户之间信息的双向保密传输。

关键词 激光技术;半导体激光器;互耦;网状网络;混沌保密通信

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1202005

Chaos Synchronization and Communication in Mesh Network Based on Mutually Coupled Semiconductor Lasers

Pan Xingmao Wu Zhengmao Tang Xi Xia Guangqiong

(School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract A chaotic mesh network system composed of four mutually coupled semiconductor lasers (SLs) is presented in this paper. For this system, the dynamical behaviors of each SL, the synchronization characteristics between arbitrary two SLs and the influence of parameter mismatches on the synchronization are investigated numerically, and the secure communication performance of such a system is analyzed. The theoretical simulation results show that all outputs from SLs in this mesh network system can route into chaos under suitable coupling condition, and global synchronization or partial synchronization can be observed for these four SLs. Based on chaos synchronization in this system, the bidirectional secure communication among multi-users can be achieved.

Key words laser technique; semiconductor lasers; mutual coupling; mesh network; chaos secure communication

OCIS codes 140.1540; 140.5960

1 引言

自 Pecora 等^[1]提出并验证混沌同步以来,实现混沌同步的各种方案不断涌现,其应用迅速扩大到神经网络、保密通信等领域^[2-5]。由于半导体激光器(SL)在外部扰动下产生的混沌载波具有宽带宽、高复杂度等优势,因此基于 SL 的混沌同步及通信受到人们的广泛关注^[6-25]。早期的研究主要集中在信息的单向保密传输,并于 2005 年在雅典的商用

光纤网络中现场实现了速率为 1 Gb/s 信息的 120 km 单向混沌保密传输^[9]。显然仅能实现单向的保密通信是不够的,信息的双向乃至多向传输才是混沌保密通信发展的必然趋势。因此,一些能实现信息的双向及多向混沌保密通信的系统方案相继被提出^[16-26]。

由两个 SL 互相耦合构成的系统是实现信息双向混沌通信最简单的方案^[16-18,20]。在这样的系统

收稿日期: 2013-07-10; 收到修改稿日期: 2013-07-25

基金项目: 国家自然科学基金(60978003,61078003,61178011,61275116)、重庆市自然科学基金(2012jjB40011)

作者简介: 潘兴茂(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光与光通信等方面的研究。E-mail: panmao.place@qq.com

导师简介: 夏光琼(1970—),女,教授,博士生导师,主要从事半导体激光非线性动力学及相关应用等方面的研究。

E-mail: gqxia@swu.edu.cn(通信联系人)

中,两个 SL 由于空间上的分离导致系统存在耦合延时。当耦合延迟时间远大于光在激光器腔内往返时间时,系统将增加额外的自由度,从而导致 SL 可呈现复杂的混沌动力学态。在合适的耦合强度条件下,互耦的两个 SL 之间可达到非等时的混沌同步^[16-17]。通过对两个 SL 分别引入光反馈^[18]或者在耦合光路中引入 SL^[19]或半透镜^[20]作为中继,这种非等时的混沌同步有可能转换为等时的混沌同步。基于两个互耦 SL 之间的混沌同步,可以实现双向保密通信^[20]。尽管双向混沌保密通信可以实现用户间实时的信息交换,但这种方式只限于两用户之间的保密通信。为了实现多用户(用户数大于 2)之间的双向信息保密传输,目前的研究主要基于两种网络构架:环型和星型^[21-25]。在环型网络结构中^[21-23],所有的 SL 首尾相连按顺序依次耦合形成一个封闭的环。在星型网络结构中^[24-25],多个 SL 同时与一共同的中心半导体激光器(C-SL)进行互耦。显然,在星型和超过三个 SL 的环型网络结构

中,并非所有的 SL 之间都有耦合光路,因此需要在用户间增加额外的信道来进行信息的传输,从而导致系统结构复杂化。基于此,本文提出了一种新型的混沌网状网络系统。在这个系统中,所有 SL 之间都存在相互耦合的光路,因此无需增加额外的信道即可用于信息的传输。以基于四个 SL 互耦构成的混沌网状网络系统为例,分析了系统的混沌同步特性以及通信性能。

2 系统结构与理论模型

图 1 所示为由四个分布反馈半导体激光器通过相互耦合构成的混沌网状网络系统的结构示意图。每一个分布反馈激光器的输出光经过分束镜(BS,分光比为 50/50)分成三束,分别注入到其他三个激光器中,并同时接受其他三个激光器输出光的注入。可调光衰减器(VOA)用于调节互耦合强度,其中 M 代表反射镜。

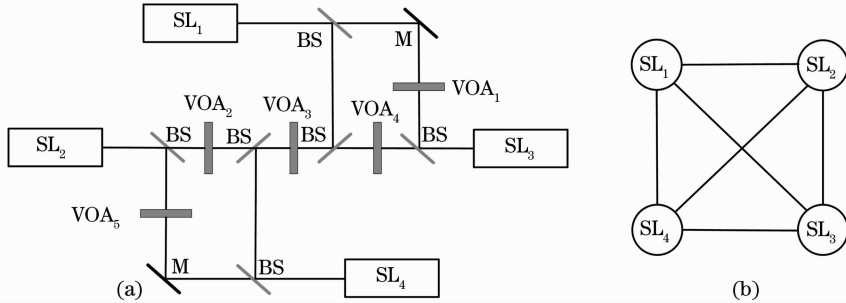


图 1 (a) 基于四个互耦半导体激光器的混沌网状网络图;(b) 相应的网络拓扑示意图
Fig. 1 (a) Schematic diagram of a mesh network based on four mutually coupled semiconductor lasers;
(b) corresponding topology diagram of the mesh network

系统中各激光器的非线性动力学可用如下 Lang-Kobayashi 速率方程进行表征:^[21]

$$\frac{dE_m(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha) \left[G_m - \frac{1}{\tau_p} \right] E_m(t) + \sum_{l=1, l \neq m}^4 \kappa_{l,m} E_l(t - \tau_{l,m}) \exp(i\Delta\omega_{l,m}t) \exp(-i\omega_l\tau_{l,m}) + \sqrt{2\beta N_m} \xi(t), \quad (1)$$

$$\frac{dN_m(t)}{dt} = \frac{I_m}{e} - \frac{N_m(t)}{\tau_n} - G_m |E_m(t)|^2, \quad (2)$$

式中,下标 $l, m=1, 2, 3, 4$ 表示 SL 的编号, E 为慢变场振幅, N 为载流子数, α 为线宽增强因子, τ_p 为光子寿命, τ_n 为载流子寿命, I 为偏置电流, e 为单位电荷, ω 为 SL 自由运行时的角频率, $\Delta\omega_{l,m} = \omega_l - \omega_m$ 为 SL_l 与 SL_m 之间的角频率差, $\kappa_{l,m}$ 为 SL_l 对 SL_m 的注入系数, $\tau_{l,m}$ 为对应的延迟时间。(1) 式的最后一项为 SL 的自发辐射噪声, β 为自发辐射速率, ξ 为高斯白噪声。增益系数表示为

$$G_m = g[N_m(t) - N_0] / (1 + \epsilon |E_m(t)|^2), \quad (3)$$

式中 g 为微分增益系数, N_0 为透明载流子数, ϵ 为饱和增益系数。

此外,对于两个混沌信号的同步性用关联函数 $C(\Delta t)$ 来定量描述,其定义为

$$C_{i,j}(\Delta t) = \frac{\langle [P_i(t) - \langle P_i(t) \rangle][P_j(t + \Delta t) - \langle P_j(t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [P_i(t) - \langle P_i(t) \rangle]^2 \rangle \langle [P_j(t + \Delta t) - \langle P_j(t) \rangle]^2 \rangle}}, \quad (4)$$

式中 $i, j(=1, 2, 3, 4)$ 表示对应编号的 SL, $\langle \cdot \rangle$ 表

示对时间求平均, Δt 为关联函数时移, $P(t)$ 为激光器输出, $|C(\Delta t)| \in [0, 1]$, $|C(\Delta t)|$ 越接近 1 表明两信号同步性能越好。

3 结果与讨论

(1)式,(2)式可利用龙格-库塔方法进行数值求解。假定所有 SL 的内部参数一致,各参数的相应取值如下: $\alpha=5, \tau_p=2 \text{ ps}, \tau_n=2 \text{ ns}, \beta=1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}, g=1.5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}, \epsilon=5 \times 10^{-7}, N_o=1.5 \times 10^8, \omega=1.219 \times 10^{15} \text{ rad/s}, \Delta\omega=0, \tau=4 \text{ ns}, I=1.8I_{th}$ ($I_{th}=14.7 \text{ mA}$)。由于系统中涉及的耦合系数个数较多,因此为了方便讨论,假定编号非相邻的两个 SL 间的耦合强度均为 k_b (即 $k_b=k_{1,3}=k_{3,1}=k_{2,4}=k_{4,2}$),而编号相邻(假定 1 和 4 相邻)的两个 SL 之间的耦合强度均为 k_r (即 $k_r=k_{1,2}=k_{2,1}=k_{2,3}=k_{3,2}=k_{3,4}=k_{4,3}=k_{4,1}=k_{1,4}$)。

而编号相邻(假定 1 和 4 相邻)的两个 SL 之间的耦合强度均为 k_r (即 $k_r=k_{1,2}=k_{2,1}=k_{2,3}=k_{3,2}=k_{3,4}=k_{4,3}=k_{4,1}=k_{1,4}$)。

3.1 混沌同步

在上述参数条件下假定 $k_b=k_r=k$,图 2(a)所示为 SL_1 输出时间序列的极值随耦合系数的分岔图,可知随着耦合强度的增加, SL_1 输出经历稳态、周期、多周期而进入混沌。图 2(b)~(d)所示为 $k_r=k_b=4 \text{ ns}^{-1}$ 时, SL_1 输出的时间序列及相应的功率谱和相图,很明显其输出为一混沌态。由于其他三个激光器与 SL_1 具有完全相同的内部参数,因此都具有相似的结果。

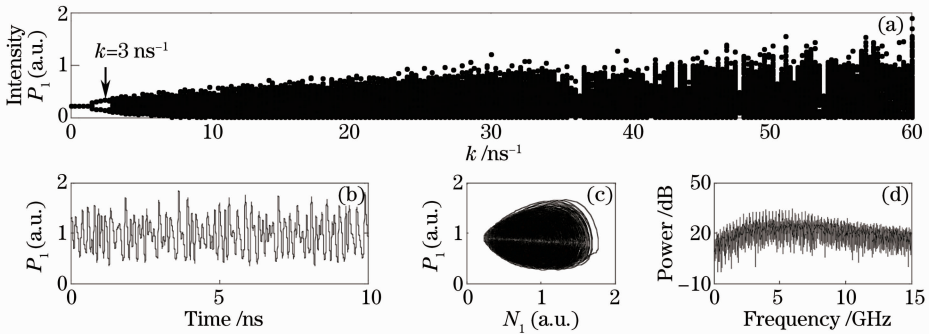


图 2 (a) SL_1 输出的功率极值随耦合强度 $k(k=k_r=k_b)$ 变化的分岔图; (b) $k_r=k_b=4 \text{ ns}^{-1}$ 时 SL_1 输出的时间序列; (c) $k_r=k_b=4 \text{ ns}^{-1}$ 时, SL_1 输出的相图; (d) $k_r=k_b=4 \text{ ns}^{-1}$ 时, SL_1 输出的功率谱

Fig. 2 (a) Bifurcation diagram as a function of the coupling strength $k(k=k_r=k_b)$; (b) time series of SL_1 with $k_r=k_b=4 \text{ ns}^{-1}$; (c) attractor of SL_1 with $k_r=k_b=4 \text{ ns}^{-1}$; (d) power spectrum of SL_1 with $k_r=k_b=4 \text{ ns}^{-1}$

激光器之间的耦合强度不仅会影响激光器的状态,同时也会影响两个激光器混沌输出的同步性能。图 3(a),(b)所示分别为相邻和非相邻的两个 SL 之间的互相关函数最大值随 k_r 及 k_b 的变化情况。选取 SL_1 与 SL_2 及 SL_1 与 SL_3 分别代表相邻和非相邻的情形进行讨论。图中 U 区域对应 SL 的输出为非混沌区域,其他区域激光器的输出为混沌态。图 3 中实线表示相邻两个激光器之间同步系数为

0.99,虚线则表示非相邻的两个激光器之间的同步系数为 0.99。需要说明的是:为了更便于区域的划分,在图中增添了另一种情形下得到的同步系数为 0.99 的曲线。基于这两条线,可以把图中 SL 呈现混沌的区域分成 I、II、III 三个区域。总体而言,在相同的 k_r 及 k_b 条件下,非相邻的两个激光器的同步性能比相邻的两个激光器的同步性能好。在 I 区域,相邻的两个激光器之间的耦合系数 k_r 相对较

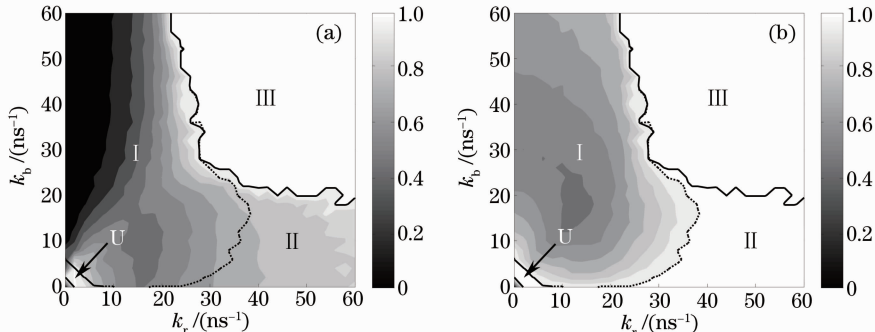


图 3 互相关系数最大值随 k_r 及 k_b 的变化图。(a) SL_1 与 SL_2 ; (b) SL_1 与 SL_3

Fig. 3 Maximum of the cross-correlation coefficient as a function of k_r and k_b . (a) SL_1 and SL_2 , (b) SL_1 and SL_3

小,尤其在 $k_r < 20 \text{ ns}^{-1}$ 的区域,此时相邻的、非相邻的两个激光器都难实现高质量的混沌同步;在 II 区域,相邻的两个激光器之间耦合系数大于非相邻的两个激光器之间的耦合系数,此时非相邻的两个激光器之间可以实现高质量的混沌同步而相邻的两个激光器的同步性能比较差(0.50~0.99)。特别地,当 $k_b = 0$ 时,此时网状网络将过渡到环状网络,其结果如 II 中的横向坐标轴所示。非相邻的两激光器之间能同步而相邻的激光器之间同步性能比较差。尽管此时系统中各激光器参数以及所受到的注入情况都相同,但两相邻激光器之间的同步与两非相邻激光器之间的同步情况却存在较大差异,这一现象在文献[27]中已有报道;而对于 III 区域,此时 k_r 及 k_b 相对较大,相邻和非相邻的激光器之间都能实现很好的同步,同步质量与两耦合系数的具体数值相关

度不大。

当 k_r 及 k_b 的值处于 II 区域时,如图 3(a)所示,此时相邻的两个激光器之间不能达到高质量的混沌同步。图 4 所示为 $k_r = 55 \text{ ns}^{-1}$, $k_b = 10 \text{ ns}^{-1}$ 时, SL_1 、 SL_2 输出的时间序列以及互相关函数。互相关函数呈现两个极大值(约为 0.84),分别出现在 $\pm 4 \text{ ns}$ 处。在两个 SL 互耦系统以及由三个 SL 构成的单向环系统中也观察到类似现象^[16,21],这是因为两个混沌信号之间超前或滞后同步的随机变化而引起的。模拟结果表明,在这一区域,非相邻的两个 SL 之间能够达到时延为 0 的高质量等时同步(相关系数接近于 1)。由于此时系统中非相邻的两 SL 之间同步效果很好,而相邻的两个 SL 的同步效果较差,因此可把这样的同步称为部分同步。

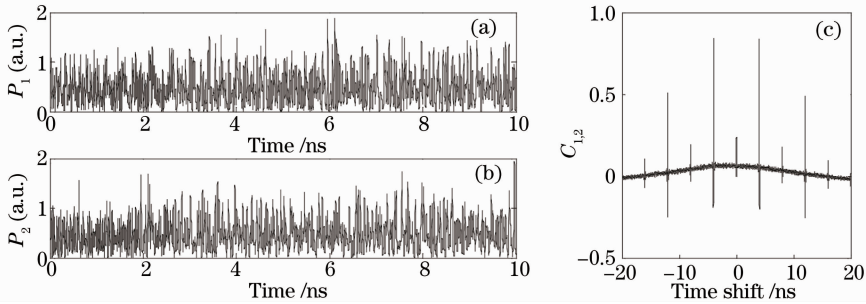


图 4 (a) SL_1 输出的时间序列; (b) SL_2 输出的时间序列; (c) $C_{1,2}$ 随时移的变化

Fig. 4 (a) Time series output from SL_1 ; (b) time series output from SL_2 ; (c) cross-correlation function $C_{1,2}$

当 k_r 及 k_b 的值处于 III 区域时,图 3 表明,此时相邻或非相邻的两个 SL 之间的互相关系数的最大值均接近 1。图 5 所示为 $k_r = 55 \text{ ns}^{-1}$, $k_b = 40 \text{ ns}^{-1}$ 时,SL 输出的时间序列以及两时间序列的互相关函数随时移的变化,可知, SL_1 与相邻的 SL_2 以及非相邻的 SL_3

均呈现零时延的完全同步。通过计算其他的任何两只 SL 的输出序列可知,此时即使 k_r 与 k_b 具有不同的值,系统中的所有 SL 之间也都能达到零时延的完全同步。由于此时系统中的所有 SL 之间均实现了完全同步,因此可称为整体同步。

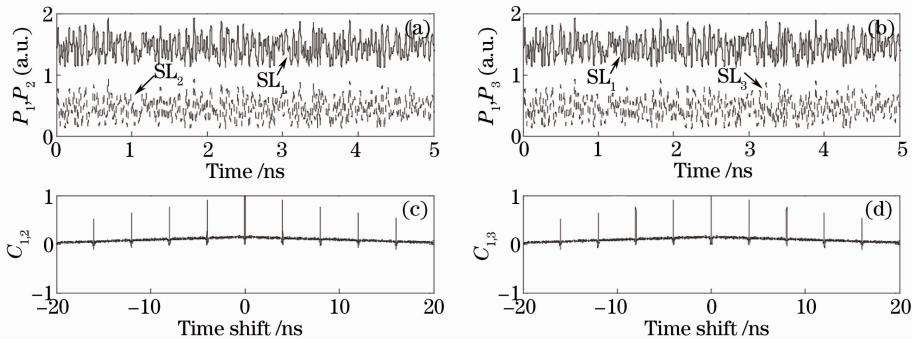


图 5 当 $k_r = 55 \text{ ns}^{-1}$, $k_b = 40 \text{ ns}^{-1}$ 时,输出的时间序列和互相关系数。(a) SL_1 和 SL_2 输出的时间序列;

(b) SL_1 和 SL_3 输出的时间序列; (c) $C_{1,2}$ 随时移的变化; (d) $C_{1,3}$ 随时移的变化

Fig. 5 Output time series and cross-correlation function when $k_r = 55 \text{ ns}^{-1}$, $k_b = 40 \text{ ns}^{-1}$. (a) Time series of SL_1 and SL_2 ; (b) time series of SL_1 and SL_3 ; (c) cross-correlation function $C_{1,2}$; (d) cross-correlation function $C_{1,3}$

3.2 参数失配对同步性能的影响

由于在实际应用中,不同激光器之间总是存在参数失配,因此研究参数失配对同步性能的影响具有现实意义。为了便于研究,假定系统中三个 SL 具有相同的参数,而只有一个 SL(这里假定 SL_1) 的参数与其他 SL 之间存在差异。采用相对参数失配来标定参数失配的大小^[28]。图 6 所示为非相邻的两个 SL 之间的互相关系数的最大值随相对参数失配的变化曲线,其中图 6(a) 对应耦合参数 $k_r = 55 \text{ ns}^{-1}$, $k_b = 10 \text{ ns}^{-1}$ (位于 II 区域), 而图 6(b) 对应 $k_r = k_b = 40 \text{ ns}^{-1}$ (位于 III 区域)。由图 6 可知,

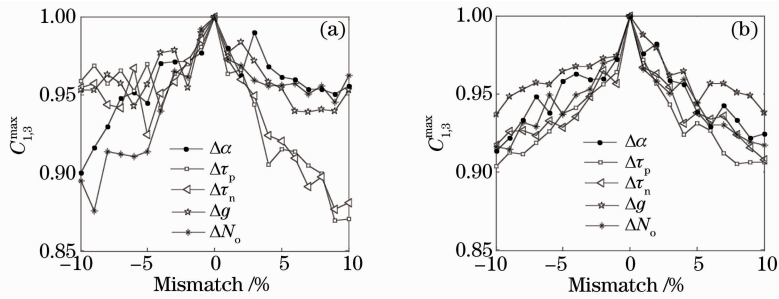


图 6 $C_{1,3}^{\max}$ 随 SL_1 参数失配率的变化曲线。(a) $k_r = 55 \text{ ns}^{-1}$, $k_b = 10 \text{ ns}^{-1}$; (b) $k_r = k_b = 40 \text{ ns}^{-1}$

Fig. 6 Maximum of the cross-correlation coefficient $C_{1,3}^{\max}$ as a function of the parameter mismatches of SL_1 .

(a) $k_r = 55 \text{ ns}^{-1}$, $k_b = 10 \text{ ns}^{-1}$; (b) $k_r = k_b = 40 \text{ ns}^{-1}$

3.3 系统的通信性能

采用文献[21]中信息加载的方式,四个速率为 1 Gb/s、调制深度为 0.08 的随机数字信号 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 分别加载到 SL_1 、 SL_2 、 SL_3 、 SL_4 的偏置电流

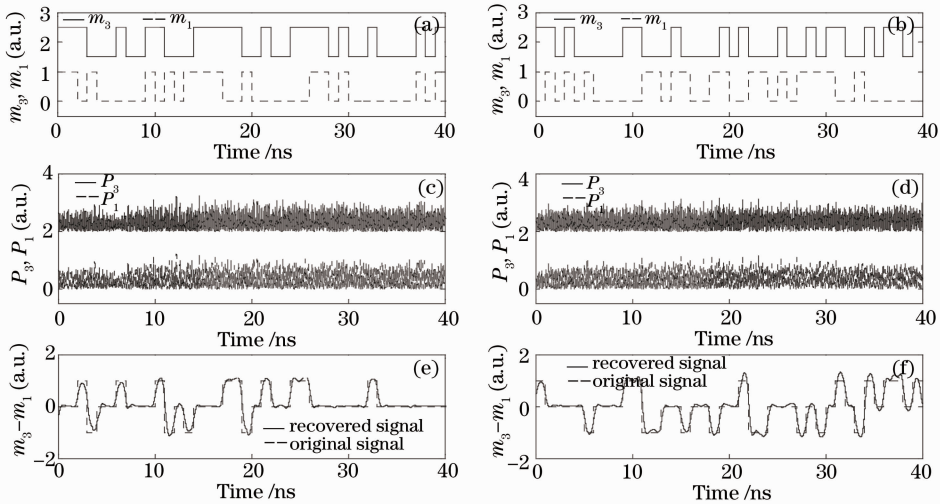


图 7 基于部分同步和整体同步方式下的信息加载与解调。(a) 部分同步时加载的信息; (b) 整体同步时加载的信息; (c) 部分同步时的激光器输出; (d) 整体同步时的激光器输出; (e) 部分同步时解调后的信息; (f) 整体同步时解调后的信息

Fig. 7 Encoded and decoded messages based on partial synchronization and total synchronization. (a) Encoded message with partial synchronization; (b) encoded message with total synchronization; (c) laser output with partial synchronization; (d) laser output with total synchronization; (e) recovered and original signals with partial synchronization; (f) recovered and original signals with total synchronization

随着参数失配的增大, $C_{1,3}^{\max}$ 呈下降趋势, 相对于 $k_r = k_b = 40 \text{ ns}^{-1}$ 时, 当 $k_r = 55 \text{ ns}^{-1}$, $k_b = 10 \text{ ns}^{-1}$ 时参数失配对 SL_1 与 SL_3 之间的同步影响要大一些; 不同参数对同步质量的影响不同, 其中参数 g 的失配对同步的影响略小于其他参数。但失配率在 $-10\% \sim 10\%$ 内变化时, 互相关函数的极大值总能维持在 0.86 以上。需要指出的是, 以上的结果是在仅考虑系统中一个 SL 的单个参数失配时得到的。而在实际应用中, 可能存在各 SL 之间的多个参数失配, 这将对系统的同步性能产生更大影响。因此, 在构建系统时, 应尽量选择内部参数匹配的 SL。

10 ns⁻¹;整体同步时 $k_r = k_b = 40 \text{ ns}^{-1}$ 。由图 7(c)、(d)可知,信息可很好地隐藏在混沌载波中。图 7(e)、(f)所示的解调信号(实线所示)是采用截止频率为 1 GHz 的四阶巴特沃斯低通滤波器对 $[P_3(t) - P_1(t)]$ 进行滤波后得到的,解调的是两个信号之差($m_3 - m_1$) (相应的原始信号之差如图中虚线所示)。由于本地信息对接收者而言是已知的,因此接收者能推测出对方传送的信息。由图 7 可知,两种方式中任意两个非相邻的 SL 均能成功实现信息的保密传输。对于第二种同步方式(整体同步),模拟结果还表明,信息在任意(相邻或非相邻)的两个 SL 之间都能实现混沌保密通信。

最后,简单考察一下该系统的安全性能。对于窃听者而言,在窃取到两相向传输的信号后做减法同样可以获得双向传输的两信息差($m_3 - m_1$)。但如果不知道 m_3 (或 m_1),不能完全恢复 m_1 (或 m_3),其原因如下:如果($m_3 - m_1$) = 1,则可以判定 $m_3 = 1$,同时 $m_1 = 0$;如果($m_3 - m_1$) = -1,则可以判定 $m_3 = 0$,同时 $m_1 = 1$ 。然而,如果($m_3 - m_1$) = 0,则只能判定 $m_3 = m_1$ 而不能确定 m_3 、 m_1 的值是 1 还是 0。图 8(a) 给出了窃听者获得的两信息差($m_3 - m_1$),图 8(b),(c) 分别为根据($m_3 - m_1$) 能判定出的部分 m_3 和 m_1 信息。可知,信息只能部分被恢复。因此,本系统的安全性是可以保证的。

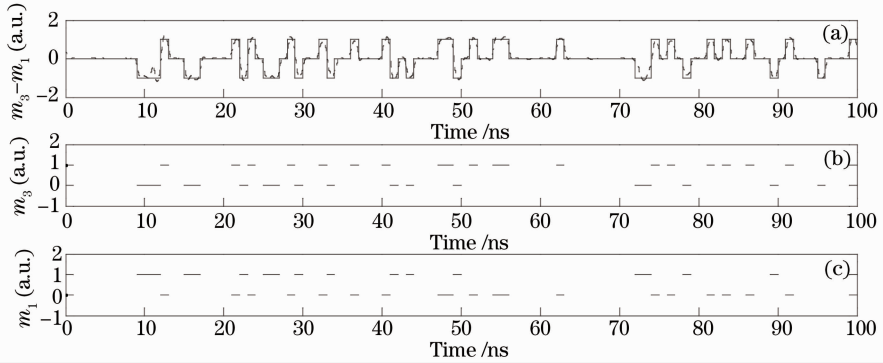


图 8 窃听者获得的信息。(a) 两信息之差($m_3 - m_1$);(b) 判定出的部分 m_3 ;(c) 判定出的部分 m_1
Fig. 8 Messages recovered by eavesdropper. (a) Difference between two messages ($m_3 - m_1$); (b) decidable message (m_3); (c) decidable message (m_1)

4 结 论

提出了一个基于四只分布反馈半导体激光器相互耦合的混沌网状网络系统,并对 SL 之间的混沌同步性能以及系统的通信性能进行理论仿真研究。研究表明,系统中所有的 SL 在合适的相互耦合条件下均可呈现混沌输出。在耦合时间固定的条件下,系统中 SL 之间可能会存在两种不同的高质量混沌同步模式:部分同步和整体同步。其中部分同步发生在相邻 SL 之间具有较强的耦合而非相邻 SL 之间的耦合强度较弱的情况,此时,非相邻的两个 SL 可实现长时间的高质量混沌同步,而相邻的两个 SL 之间存在超前-滞后角色的随机改变会导致无法达到高质量混沌同步;整体同步发生在相邻和非相邻的 SL 之间都具有较强的耦合强度时,此时所有的 SL 之间都能实现高质量的等时同步。基于上述两种同步方式,对信息在 SL 之间的双向传输性能进行了讨论,结果表明该系统可用于多用户之间的混沌保密通信。

参 考 文 献

- 1 L M Pecora, T L Carroll. Synchronization in chaotic systems[J]. Phys Rev Lett, 1990, 64(8): 821-824.
- 2 U Parlitz, L O Chua, L Kocarev, et al.. Transmission of digital signals by chaotic synchronization [J]. Int J Bifurcation and Chaos, 1992, 2(4): 973-977.
- 3 C W Wu, L O Chua. A simple way to synchronize chaotic systems with applications to secure communication systems[J]. Int J Bifurcation and Chaos, 1993, 3(6): 1619-1627.
- 4 R Mislovaty, E Klein, I Kanter, et al.. Public channel cryptography by synchronization of neural networks and chaotic maps[J]. Phys Rev Lett, 2003, 91(11): 118701.
- 5 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.
- 6 J G Wu, Z M Wu, G Q Xia, et al.. Isochronous synchronization between chaotic semiconductor lasers over 40-km fiber links[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2011, 23(24): 1854-1856.
- 7 Shen Cuili, Ye Huiying, Wei Fupeng, et al.. Analysis of chaos synchronization in new three-laser scheme [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(10): 101401. 申翠丽, 叶会英, 魏富鹏, 等. 新型三激光器结构的混沌同步特性[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 101401.
- 8 Hu Hanping, Su Wei, Yu Zhiliang, et al.. Chaos generation of variable parameters and secure communication based on optoelectronic feedback oscillation[J]. Acta Optica Sinica, 2013,

- 33(5); 0506006.
- 胡汉平, 苏威, 于志良, 等. 基于动态参数的光电延迟振荡系统及其保密通信研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0506006.
- 9 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.
- 10 Yan Senlin. Frequency enhancement and control of chaos in two spatial coupled semiconductor lasers using optical feedback[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0302003.
- 颜森林. 空间耦合半导体激光器高维混沌系统的光反馈增强与控制[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0302003.
- 11 Hu Hanping, Yu Zhiliang, Liu Lingfeng. Chaotic impulse synchronization of opto-electronic feedback[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(19): 190504.
- 胡汉平, 于志良, 刘凌峰. 光电反馈混沌系统脉冲同步特性研究[J]. 物理学报, 2012, 61(19): 190504.
- 12 Yan Senlin. Frequency enhancement and control of chaos in two spatial coupled semiconductor lasers using external light injection[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(16): 160505.
- 颜森林. 外部光注入空间耦合半导体激光器高维混沌系统的增强与控制研究[J]. 物理学报, 2012, 61(16): 160505.
- 13 Liu Yingying, Pan Wei, Jiang Ning, *et al.*. Isochronal chaos synchronization of a chain mutually coupled semiconductor lasers[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(2): 024208.
- 刘莹莹, 潘伟, 江宁, 等. 链式互耦半导体激光器的实时混沌同步[J]. 物理学报, 2013, 62(2): 024208.
- 14 Yanqing Ding, Anbang Wang, Mingjiang Zhang, *et al.*. Wavelength conversion of chaotic message through gain modulation by injection-locked Fabry-Perot laser diode[J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(4): 368–371.
- 15 J G Wu, Z M Wu, L Fan, *et al.*. Experimental demonstration of LD-based bidirectional fiber-optic chaos communication[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2013, 25(6): 587–590.
- 16 J Mulet, C Mirasso, T Heil, *et al.*. Synchronization scenario of two distant mutually coupled semiconductor lasers[J]. J Opt B Quantum Semiclass Opt, 2004, 6(1): 97–105.
- 17 T Heil, I Fischer, W Elsässer, *et al.*. Chaos synchronization and spontaneous symmetry-breaking in symmetrically delay-coupled semiconductor lasers[J]. Phys Rev Lett, 2001, 86(5): 795–798.
- 18 N Gross, W Kinzel, I Kanter, *et al.*. Synchronization of mutually versus unidirectionally coupled chaotic semiconductor lasers[J]. Opt Commun, 2006, 267(2): 464–468.
- 19 I Fischer, R Vicente, J M Buldu, *et al.*. Zero-lag long-range synchronization via dynamical relaying[J]. Phys Rev Lett, 2006, 97(12): 123902.
- 20 R Vicente, C R Mirasso, I Fischer. Simultaneous bidirectional message transmission in a chaos-based communication scheme[J]. Opt Lett, 2007, 32(4): 403–405.
- 21 J M Buldú, M C Torrent, J García-Ojalvo. Synchronization in semiconductor laser rings[J]. J Lightwave Technol, 2007, 25(6): 1549–1554.
- 22 Y Aviad, I Reidler, M Zigzag, *et al.*. Synchronization in small networks of time-delay coupled chaotic diode lasers[J]. Opt Express, 2012, 20(4): 4352–4359.
- 23 L P Meffo, P Wofo, S Domngang. Cluster states in a ring of four coupled semiconductor lasers[J]. Commun Nonlinear Sci Numer Simul, 2007, 12(6): 942–952.
- 24 W L Zhang, W Pan, B Luo, *et al.*. One-to-many and many-to-one optical chaos communications using semiconductor lasers[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(9): 712–714.
- 25 M Bourmpos, A Argyris, D Syvridis. Sensitivity analysis of a star optical network based on mutually coupled semiconductor lasers[J]. J Lightwave Technol, 2012, 30(16): 2618–2624.
- 26 Li Guanghui, Wang Anbang, Feng Ye, *et al.*. Synchronization and bidirectional communication without delay line using strong mutually coupled semiconductor lasers[J]. Chin Phy B, 2010, 19(7): 070515.
- 27 J Kestler, W Kinzel, I Kanter. Sublattice synchronization of chaotic networks with delayed couplings[J]. Phys Rev E, 2007, 76(3): 035202(R).
- 28 J Liu, Z M Wu, G Q Xia. Dual-channel chaos synchronization and communication based on unidirectionally coupled VCSELs with polarization-rotated optical feedback and polarization-rotated optical injection[J]. Opt Express, 2009, 17(15): 12619–12626.

栏目编辑: 张腾