

# 基于光电反馈延迟的多点耦合混沌同步和通信

胡汉平 陈笑风\* 苏 威 谢飞龙 高孝婧

(华中科技大学自动化学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 为了实现稳定的、可以同时同步的多点混沌通信,提出一种基于光电反馈延迟的双向混沌通信模型和多点耦合的混沌同步模型。在双向混沌通信模型中引入了时间延迟和混沌调制信息加密技术,增加了系统的安全性。数值分析了系统的同步性能、安全性能和通信性能,研究结果表明,系统能够历经很短的时间实现高质量的、稳定的同时同步,实现双向通信。并且延迟时间、信息信号功率、激光器光信号功率、相位的改变在其他参数匹配的情况下,不会降低系统的同步性能,即系统的信息信号功率、光信号功率、延迟时间、相位均可作为系统的密钥,提高系统的安全性。这种双向混沌通信模型可以拓展为符合一定拓扑结构的多点耦合混沌通信模型,并且推测随着网络中节点数的增加,系统的复杂度增加。

**关键词** 光通信;多点耦合混沌同步;光电反馈

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0406006

## Multi-Coupled Chaos Synchronization and Communication Based on Optoelectronic Feedback Delay

Hu Hanping Chen Xiaofeng Su Wei Xie Feilong Gao Xiaojing

(School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** In order to achieve a stable, isochronous and synchronous multi-coupled chaos communication, a bidirectional chaos communication system and a multi-coupled chaos synchronization model using optoelectronic feedback delay are proposed. The time delay and chaos modulation encryption technology are introduced to increase the security of the system. The synchronization characteristics, safety performances and communication performances of the system are numerically analyzed. The results show that the stable isochronous synchronization can be observed after a very short time. What's more, the changes of the delay time, powers of information signals, powers of laser optical signals and phases have not bad influences on the system qualities, namely these parameters can be used as keys to improve the security of the system. The proposed bidirectional communication system can be extended to a multi-coupled communication system which meets a certain topological structure, and we speculate that with the increase of the dots in network, the complexity of the system increases.

**Key words** optical communications; multi-coupled chaos synchronization; optoelectronic feedback

**OCIS codes** 060.4510; 140.3325; 190.4360

## 1 引 言

混沌信号的初值敏感性和长期行为不可预测性使得基于混沌信号的保密通信的研究具有深远的前景和意义。自 Pecora 等<sup>[1]</sup>从理论、数学和实验上证明了两个单向耦合的混沌系统可以被同步以来,混沌同步和混沌保密系统成为非常热门的话题<sup>[2-7]</sup>。

单向耦合的混沌通信系统中混沌的产生总体上可以分为两类:1)利用激光二极管(LD)内部的非线性性质,采用光注入<sup>[2]</sup>、光反馈<sup>[3-4]</sup>、光电反馈<sup>[5]</sup>等形式产生混沌信号;2)将激光二极管作为光源,工作在线性区域,利用非线性器件的非线性性质,借助光电反馈的形式产生混沌信号<sup>[8]</sup>。

**收稿日期:** 2013-10-10; **收到修改稿日期:** 2013-12-14

**作者简介:** 胡汉平(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事信息安全方面的研究。

E-mail: bemysself0724@163.com

\* **通信联系人.** E-mail: chenxfeng123@126.com

这种单向耦合结构显然不能满足实际的需要。近几年,已有一些双向混沌通信系统被提出<sup>[9-10]</sup>。由于网络中有限的传输速率,通信双方之间存在着网络延迟,这种网络延迟成为双向或多向耦合系统中首先必须要面对和解决的问题。尽管如此,实验已经证明相互耦合的半导体激光器之间存在复杂的动力学特性,并且能够通过光电反馈<sup>[9]</sup>、利用第三个激光器的驱动<sup>[10]</sup>等方式实现双向混沌同步。在面对面的相互耦合的激光二极管结构中,实验表明很难实现稳定的同时同步<sup>[11]</sup>。现有的大量的研究已在解决这个问题,如在两个激光器之间引入一个激光器(无法同其他两个激光器同步)<sup>[12]</sup>、利用不对称偏置电流<sup>[13]</sup>等。此外,已有不少的文章从理论和实验上证明了两个相互耦合的激光器之间的混沌同步和通信,但关于网络中的混沌同步和混沌通信模型的研究相对较少。

为了解决上述的两大关键问题,达到稳定的同时同步、实现多点间的混沌通信,本文提出一种基于

光电反馈延迟的双向混沌通信系统和多点耦合的同步模型,并通过接收端的延迟线的调节来消除网络中由于传输速度限制带来的延迟。

## 2 双向耦合系统模型

基于光电反馈延迟的双向混沌通信系统模型如图 1 所示。系统中的通信双方既可以作为发送端又可以作为接收端,为了便于介绍,假设左边为通信甲方,右边为通信乙方。甲方 LD1 为连续光激光器,工作在功率电流曲线的线性区域,发出的光信号作为 MZ1 的输入信号, MZ1 的输出信号  $c_1(t)$  (混沌载波)和信息信号  $m_1(t)$  通过 C1 耦合,经过 D1 后通过 BS1 按 1:1 的比值分为两束:一束通过 F12 到达乙方;另一束经过 D3 和通过 F21 接收到的乙方信号耦合,经过 PD1 和 RF1 后作为 MZ1 的驱动电压,使其工作在高度非线性区域(驱动电压大于半波电压),形成光电反馈。

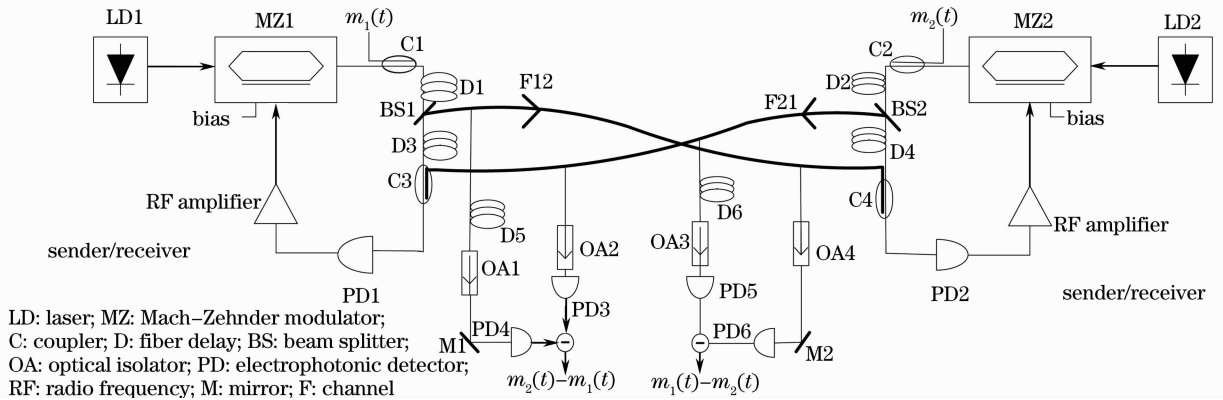


图 1 基于光电反馈延迟的双向混沌通信系统示意图

Fig. 1 Structure of bidirectional chaos communication system based on optoelectronic feedback delay

通过调节图 1 中 D5 和 D6 可以消除解码时网络传输延迟造成的影响。

此信息解码的原则与传统的基于混沌带通滤波(CPF)效应的解码方式不同,即不是利用接收端产生的混沌信号与接收到的信号的不同进行解码,而是直接利用信道中传输的信号进行解码:将 F12 中的信号  $F_{12}[m_1(t)$  与  $c_1(t)$  的混合信号]与 F21 中的信号  $F_{21}[m_2(t)$  与  $c_2(t)$  的混合信号]直接相减,当系统处于耦合同步状态时,有  $c_1(t) = c_2(t)$ ,相减后得到的是  $m_1(t)$  和  $m_2(t)$  的差信号  $\Delta m(t)$ ,当知道其中的一个信号  $m_1(t)$  或  $m_2(t)$  时就可以解调出相应的信息信号。

## 3 双向耦合系统动力学方程

假设 LD1、LD2 的功率为  $P_1$ 、 $P_2$ ,  $m_1(t)$  和  $m_2(t)$  的功率为  $P_3$ 、 $P_4$ ,  $m_1(t)$  和  $m_2(t)$  的功率为  $P_3$ 、 $P_4$ , D1、D2、D3、D4 的延迟时间为  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ ,网络中的传输延迟为  $\tau_{12}$ 、 $\tau_{21}$ , PD 的放大增益为  $g$ , RF 放大器的增益为  $\beta$ ,带通滤波器的高低截止频率为  $f_H$  和  $f_L$ ,系统的整体衰减为  $A$ ,分束器(BS)按比值 1:1 进行光分束。

马赫-曾德尔(M-Z)调制器的输出特性方程:

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}} \cos^2 \left[ \frac{\pi V(t)}{2V_{\pi\text{RF}}} + \frac{\pi V_B}{2V_{\pi\text{DC}}} \right], \quad (1)$$

式中  $V(t)$  为加载在马赫-曾德尔调制器上的调制电压,  $V_B$  为偏置电压,  $V_{\pi\text{RF}}$  为射频(RF)半波电压,  $V_{\pi\text{DC}}$  为偏置半波电压。

RF 放大器的输出特性方程：

$$V_{in}(t) = \left(1 + \frac{f_L}{f_H}\right)V_{out}(t) + \frac{1}{2\pi f_H} \frac{d}{dt}V_{out}(t) + 2\pi f_L \int_{t_0}^t V_{out}(s) ds. \quad (2)$$

结合(1)、(2)式和  $f_H \gg f_L$  可得

$$x_1(t) + \frac{1}{\theta} \int_{t_0}^t x_1(s) ds + \tau \frac{d}{dt}x_1(t) = G_1 P_3 m_1(t - T_1 - T_3) + G_1 P_1 \cos^2[x_1(t - T_1 - T_3) + \phi_1] + G_1 P_4 m_2(t - T_2 - \tau_{21}) + G_1 P_2 \cos^2[x_2(t - T_2 - \tau_{21}) + \phi_2], \quad (3)$$

$$x_2(t) + \frac{1}{\theta} \int_{t_0}^t x_2(s) ds + \tau \frac{d}{dt}x_2(t) = G_2 P_3 m_1(t - T_1 - \tau_{12}) + G_2 P_1 \cos^2[x_1(t - T_1 - \tau_{12}) + \phi_1] + G_2 P_4 m_2(t - T_2 - T_4) + G_2 P_2 \cos^2[x_2(t - T_2 - T_4) + \phi_2], \quad (4)$$

式中  $T_3 = \tau_{12}, T_4 = \tau_{21}, x_1(t) = \frac{\pi V_1(t)}{2V_{\pi RF1}}, x_2(t) = \frac{\pi V_2(t)}{2V_{\pi RF2}}, \tau = \frac{1}{2\pi f_H}, \theta = \frac{1}{2\pi f_L}, \phi_1 = \frac{\pi V_{B1}}{2V_{\pi DC1}}, \phi_2 = \frac{\pi V_{B2}}{2V_{\pi DC2}}, G_1 = \frac{A_1 \beta_1 g_1 \pi}{4V_{\pi RF1}}, G_2 = \frac{A_2 \beta_2 g_2 \pi}{4V_{\pi RF2}}$ 。(3)式和(4)式中的下标 1, 2 分别对应系统中甲、乙方的系统参数或变量。

## 4 双向耦合系统数值分析

(3)、(4)式为时滞微分方程,可以通过 Runge-Kutta 方法求解。假设两激光器具有相同器件参数,即  $G_1 = G_2 = 5, \phi_1 = \phi_2 = -\frac{\pi}{4}, T_1 = T_2 = 30 \text{ ns}, \tau = 20 \text{ ps}, \theta = 1.6 \mu\text{s}$ ,系统的初始值为  $x_1(1) = 1, x_2(1) = 2$ ,调制深度为 2%,可用 Matlab 软件进行仿真。

### 4.1 同步质量

图 2 为混沌信号的局部时序图,通过对比可以看出两个混沌信号在相互耦合后,随着时间的演变规律相同。

为了进一步从整体上分析该双向耦合混沌通信

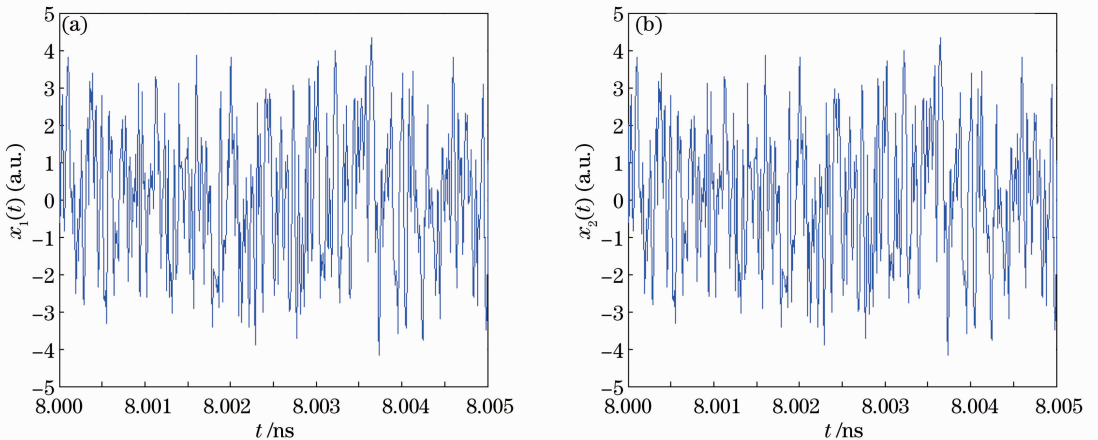


图 2 混沌信号的局部时序图。(a)  $x_1(t)$ ; (b)  $x_2(t)$

Fig. 2 Partial sequence diagrams of chaos signals. (a)  $x_1(t)$ ; (b)  $x_2(t)$

系统的同步质量,分析了两个混沌信号的同步效果,如图 3 所示。从图 3 可以看出,该系统在时域上可以实现高质量的同时同步,由放大图可知,系统进入同步状态所经历的时间很短。

### 4.2 参数失配对系统同步性能的影响

在关于混沌同步的相关研究中,系统实现完全同步必须要求通信的发送端和接收端的参数完全匹配,但这在实际应用中往往很难做到,这里用平均同步误差  $\sigma$  来衡量参数失配对系统同步性能的影响即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\langle [x_1(t) - x_2(t)]^2 \rangle}{\langle x_1(t)^2 \rangle}}, \quad (5)$$

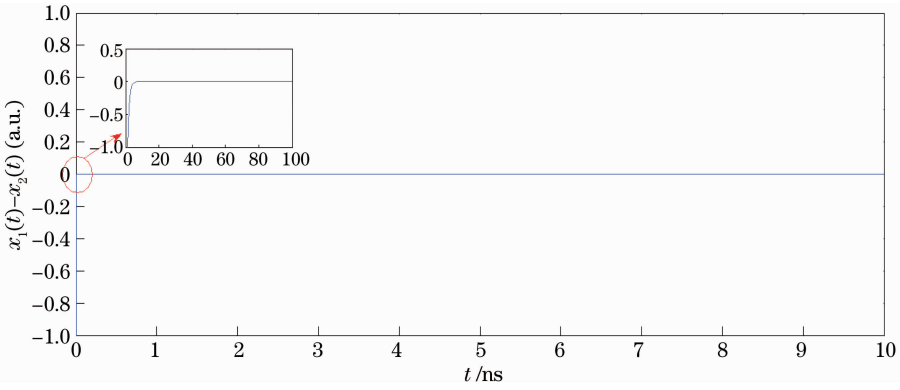


图 3 混沌信号同步效果图

Fig. 3 Synchronization effect of two chaos signals

式中 $\langle \rangle$ 表示取时间的平均。平均同步误差 $\sigma$ 大于零,且当 $\sigma=0$ 时实现了完全同步, $\sigma$ 越趋于零,表明同步效果越好。

比较系统的动力学方程(3)、(4)式的差别可知,除去状态变量不同外,(3)式右边包含 $G_1 P_3 m_1(t - T_1 - T_3)$ 、 $G_1 P_1 \cos^2[x_1(t - T_1 - T_3) + \phi_1]$ 、 $G_1 P_4 m_2(t - T_2 - \tau_{21})$ 、 $G_1 P_2 \cos^2[x_2(t - T_2 - \tau_{21}) + \phi_2]$ 这四项,(4)式右边包含 $G_2 P_3 m_1(t - T_1 - \tau_{12})$ 、 $G_2 P_1 \cos^2[x_1(t - T_1 - \tau_{12}) + \phi_1]$ 、 $G_2 P_4 m_2(t - T_2 - T_4)$ 、 $G_2 P_2 \cos^2[x_2(t - T_2 - T_4) + \phi_2]$ 这四项,当 $G_1 = G_2, T_3 = \tau_{12}, T_4 = \tau_{21}$ 时,(3)式和(4)式相同。

在以下的仿真结果中,均为去除前 100 个不稳定点后,取 40000 次迭代结果的时间平均。

#### 4. 2. 1 $P_1$ 和 $P_2$ 、 $P_3$ 和 $P_4$ 、 $T_1$ 和 $T_2$ 、 $\phi_1$ 和 $\phi_2$ 失配

当 $G_1 = G_2, T_3 = \tau_{12}, T_4 = \tau_{21}$ 时,(3)式和(4)式相同(仅状态变量不同),在相互耦合的作用下,两方程的动力学特性相同,任意改变系统的 $P_1$ 和 $P_2$ 、 $P_3$ 和 $P_4$ 、 $T_1$ 和 $T_2$ 、 $\phi_1$ 和 $\phi_2$ 的比值 $\eta$ 只会改变两个混沌信号发生同步时的取值,不会降低同步质量。由图 4 可以看出,当 $P_1/P_2$ 、 $P_3/P_4$ 、 $T_1/T_2$ 和 $\phi_1/\phi_2$ 在 0.5 ~ 1.5 之间变化时,系统的平均同步误差 $\sigma$ 大致保持在 $10^{-7}$ 数量级。

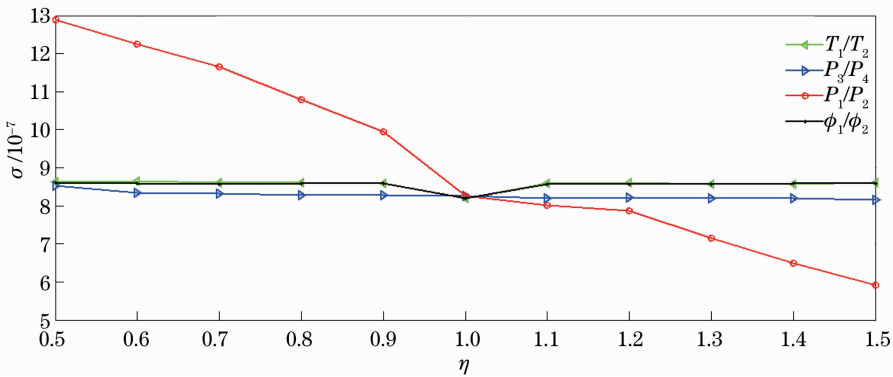


图 4  $P_1$  和  $P_2$ 、 $P_3$  和  $P_4$ 、 $T_1$  和  $T_2$ 、 $\phi_1$  和  $\phi_2$  失配时的平均同步误差  $\sigma$

Fig. 4 Average synchronization errors with the mismatches between  $P_1$  and  $P_2$ ,  $P_3$  and  $P_4$ ,  $T_1$  and  $T_2$ ,  $\phi_1$  and  $\phi_2$

综合以上的分析可知,激光器光功率 $P_1$ 、 $P_2$ 、信息信号功率 $P_3$ 、 $P_4$ 、延迟时间 $T_1$ 、 $T_2$ 、相位 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 这四组参数的失配只会改变两个混沌信号发生同步时的取值,不会影响同步质量,也就是说这 8 个可控参数均可作为系统的密钥,显著地提高系统的安全性。

#### 4. 2. 2 系统增益 $G_1$ 、 $G_2$ 失配

下面重点分析系统增益失配时对系统的同步性能的影响。图 5 为当 $G_1=5$ 、 $G_2$ 从 4 到 6 发生变化时系统的平均同步误差 $\sigma$ 的值。由图可以看出,随

着增益系数不匹配的程度增加,系统的平均同步误差也相应增加,且两者之间呈现出线性关系,当 $G_2$ 与 $G_1$ 不匹配程度很小时,系统的同步误差也很小。

在实际的通信模型的部署过程中<sup>[14]</sup>,由于人为或者环境的因素很难保证参数完全一致,造成参数的失配,从而影响同步的质量。本文提出的双向耦合的混沌通信系统对参数失配具有很好的容忍度,为实际部署提供了条件。

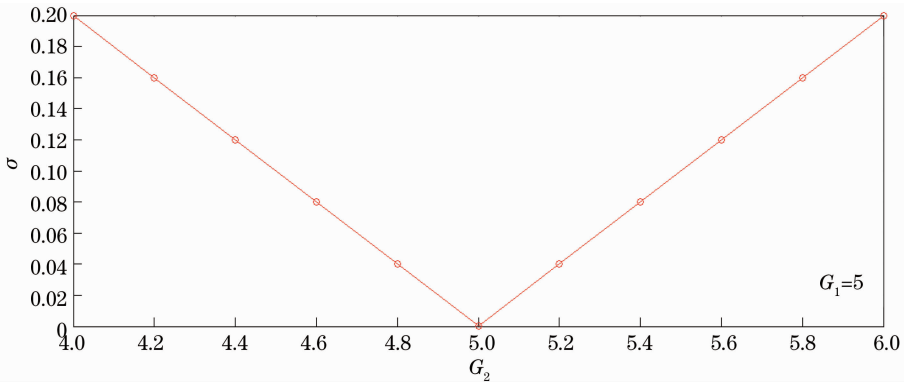


图 5  $G_1$  与  $G_2$  失配时的平均同步误差  $\sigma$

Fig. 5 Average synchronization error with the mismatch between  $G_1$  and  $G_2$

### 4.3 通信性能

#### 4.3.1 参数匹配时的通信性能

下面以双向耦合的混沌通信系统为例,分析系统对信息加密和解密的过程。由系统结构图 1 可知,信息信号  $m_i(t)$ ,参与到了混沌信号  $x_i(t)$  的产生过程中( $i=1,2$ ),即采用了混沌调制和信息加密技术,这种加密方式相对于混沌掩盖和混沌键控而言,具有安全性高、抗信道噪声强、信号幅度可以大于混

沌载波的幅度等优点<sup>[16]</sup>。

图 6 为参数匹配时,两点耦合混沌系统的加解密过程,其中  $m_1(t)$  和  $m_2(t)$  分别为通信甲、乙方发送的原始信息信号, $m'_1(t)$  和  $m'_2(t)$  分别为甲、乙方解调后的信息信号。从图 6 中看出,信息可以很好地隐藏在混沌载波中,在采用滤波器滤波后,通信双方都能实现将对方发送的信号进行正确解调,实现双向通信。

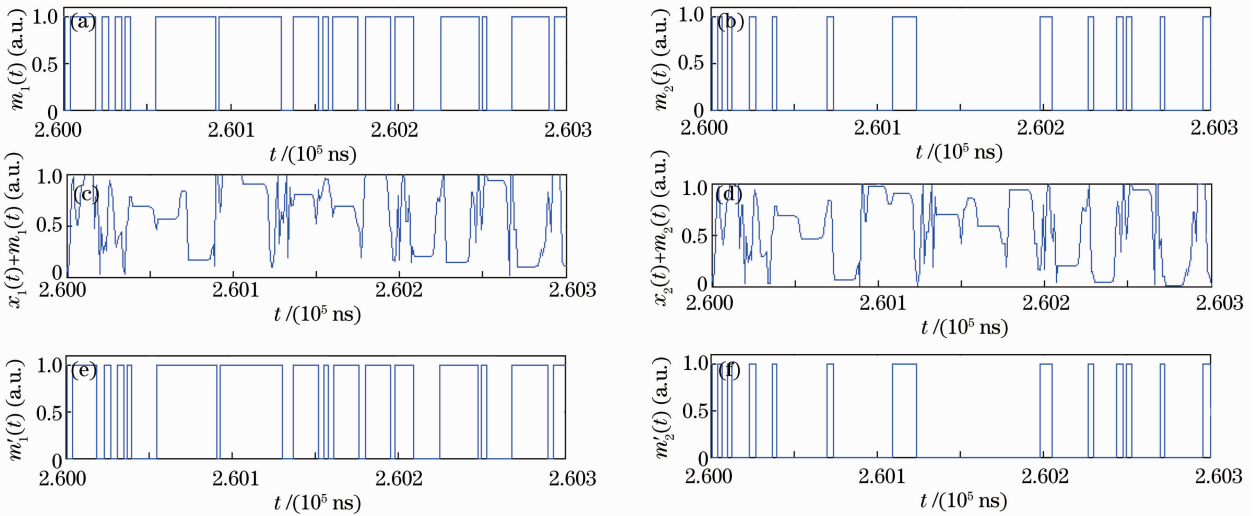


图 6 两点耦合混沌系统的加、解密过程

Fig. 6 Encryption and decryption processes of mutually coupled system

#### 4.3.2 光纤信道对通信性能的影响

光在光纤信道中传输,信道中的光的衰减、色散和非线性效应都会对混沌同步效果产生影响<sup>[15]</sup>。针对这种不利影响,可以通过在接收混沌光信号时添加补偿模块,如利用掺铒光纤放大器对接收到的光信号进行放大。然而,在实际操作和环境中,这种补偿不能达到 100% 的效果,因此,一个混沌通信系统必须对光纤中的不利影响因素有一定的容忍度才具有实际应用价值。下面考虑当其中一个光纤信道

产生 1% 的衰减时,对系统通信性能的影响,如图 7 和图 8 所示。图 8 中  $m''_1(t)$  和  $m''_2(t)$  分别为乙、甲方解调后经过滤波的信息信号。

由图 7 和图 8 可以看出,在调制深度为 2%,当一个光纤信道发生 1% 的衰减时,通信双方均能无误码地正确解码。同样,由于本文采用的是混沌调制和信息加密技术,信息信号的幅度不要求远远小于载波的幅度,因此可以通过提高信息信号的幅度来提高通信质量。

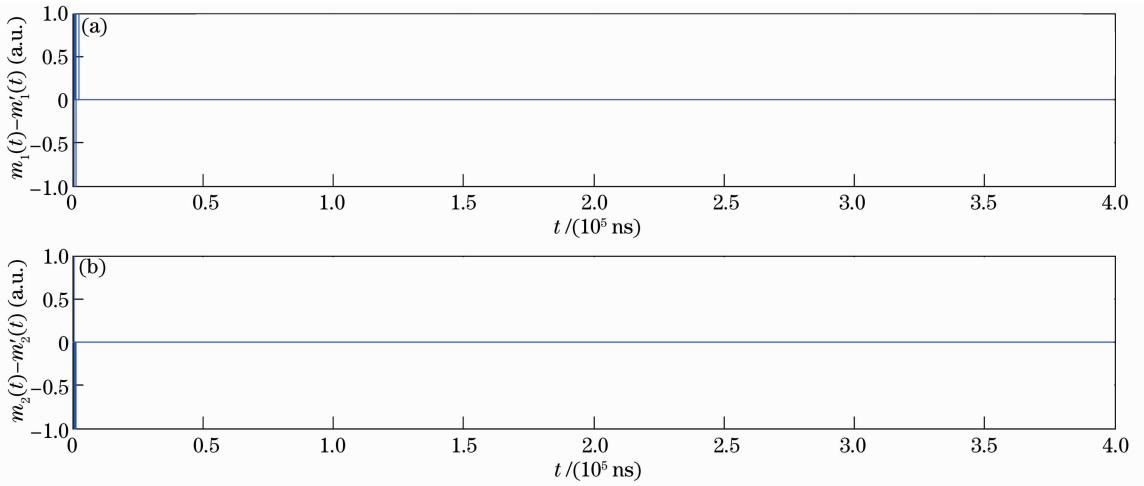


图 7 信道有 1% 衰减时的解码效果

Fig. 7 Decoding effect in the channel with 1% attenuation

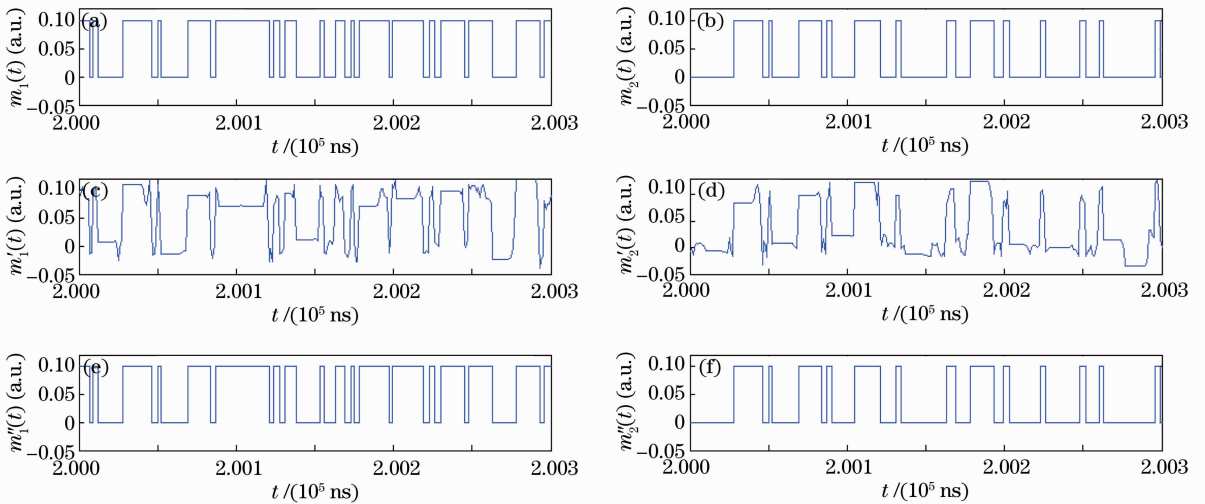


图 8 信道发生 1% 衰减时的解码。(a)  $m_1(t)$ ; (b)  $m_2(t)$ ; (c) 滤波前的  $m_1'(t)$ ; (d) 滤波前的  $m_2'(t)$ ; (e) 滤波后的  $m_1''(t)$ ; (f) 滤波后的  $m_2''(t)$

Fig. 8 Decoding process in the channel with 1% attenuation channel (a)  $m_1(t)$ ; (b)  $m_2(t)$ ; (c)  $m_1'(t)$  before filtering; (d)  $m_2'(t)$  before filtering; (e)  $m_1''(t)$  after filtering; (f)  $m_2''(t)$  after filtering

#### 4.4 安全性

安全性是衡量一个通信系统模型的重要指标之

一<sup>[17]</sup>,若一个混沌安全通信系统的安全性不高,这  
个系统也就失去了应用的价值。根据混沌的李雅普

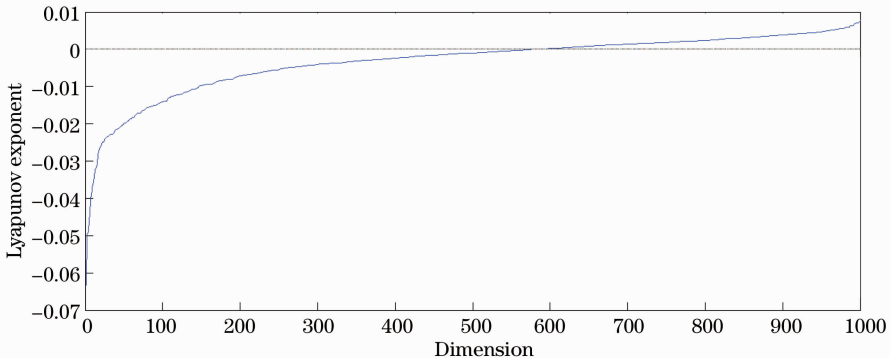


图 9 李雅普诺夫指数

Fig. 9 Lyapunov exponent



诺夫指数判定有：当系统存在两个及两个以上正李雅普诺夫指数时，系统为混沌的。图 9 给出了该双向耦合混沌安全通信系统的载波信号的李雅普诺夫指数(取 1000 维)，可以看出，正的李雅普诺夫指数个数远大于 2，载波信号是混沌的。

度量熵描述的是系统的混沌复杂度，对于有限维系统，度量熵越大，系统越“混沌”，对于无限维系统，当取的维数相同时，度量熵大的系统较“混沌”。系统的度量熵可表示为<sup>[18]</sup>

$$h = \sum_{i=1}^k \lambda_i^+, \quad (6)$$

式中  $k$  为系统的维数， $\lambda_i^+$  代表正的李雅普诺夫指数。利用(6)式计算出系统的度量熵  $h=1.185$ 。

系统的安全性主要体现在以下几个方面：

- 1) 引入了延迟时间  $T_1$ 、 $T_2$ ，使得混沌的相空间变为无穷维，极大地提高了混沌的复杂度和系统的安全性；
- 2) 系统的激光器光功率、信息信号功率、延迟时间和相位的失配不会降低同步质量，均可作为系统的密钥，显著提高系统的安全性；
- 3) 系统采用的信息加密技术为混沌调制技术，

这种加密技术的安全性和误码率都优于混沌掩盖和混沌键控技术<sup>[16]</sup>；

4) 系统的结构安全性高。下面结合系统框图图 1 进一步分析。攻击者能截取的信号为信道信号  $F_{12}$  和  $F_{21}$ ， $F_{12}$  为  $m_1(t)$  和混沌载波  $x_1(t)$  的混合信号， $F_{21}$  为  $m_2(t)$  和混沌载波  $x_2(t)$  的混合信号。当攻击者截获了  $F_{12}$  或者  $F_{21}$  时，无法对信息进行解密，因为它获得的是一个隐藏了信息的混沌信号；当攻击者同时截获了  $F_{12}$  和  $F_{21}$  时，由于网络中存在着传输延迟，并且不知道  $m_1(t)$  或  $m_2(t)$ ，攻击者仍不能成功攻击该系统。

综合以上分析可知，该双向耦合系统的安全性很高。要想进一步提高系统的安全性，还可以采用文献<sup>[19]</sup>提出的动态参数的光电延迟振荡结构。

### 5 多点耦合混沌通信系统

图 1 所描述的双向耦合混沌通信系统还可以拓展为多点耦合的混沌通信系统，只要满足系统中每个节点的度相同(可通过自反馈的方式使得节点的度相同)，图 10 给出几种满足这种要求的拓扑结构图。

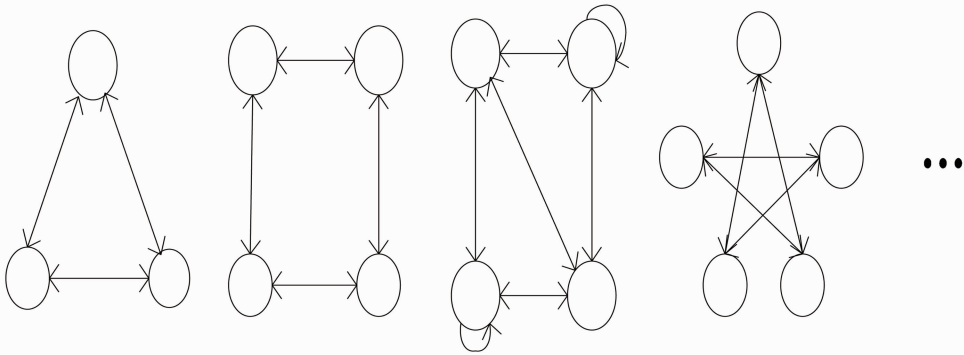


图 10 几种满足要求的多点耦合通信模型拓扑图

Fig. 10 Several topologies of multi-coupled chaos communication model

设有  $m$  节点的网络中，各节点的度均为  $n$ ，网络中的某个节点  $i$ ，取与  $i$  相连的各节点分别为  $1, 2, 3, \dots, n$ (包括自反馈)，则  $i$  点的动力学方程为

$$x_i(t) + \frac{1}{\theta} \int_{t_0}^t x_i(s) ds + \tau \frac{d}{dt} x_i(t) = G_i \sum_{j=1}^n P_j \cos^2[x_j(t - T_j - \tau_j) + \phi_j], \quad i = 1, 2, 3, \dots, m, \quad (7)$$

式中  $x_i(t) = \frac{\pi V_i(t)}{2V_{\pi R F_i}}$ ， $\tau = \frac{1}{2\pi f_H}$ ， $\theta = \frac{1}{2\pi f_L}$ ， $G_i$  是第  $i$  个节点的总增益系数， $P_j$  是第  $j$  个节点的激光器光功率， $T_j$  是  $j$  节点的光电反馈延迟时间， $\tau_j$  为网络中的传输延时  $j$  节点处的延迟调节时间的和。

当  $G_1 = G_2 = G_3 = \dots = G_{m-1} = G_m$  时，网络中  $m$  个节点的动力学方程相同(状态变量不同)，可以

实现同步。

下面以三点相互耦合的结构为例，分析当参数匹配时系统的同步效果、解码效果和系统的复杂度，设初始值为  $x_1(1)=1, x_2(1)=2, x_3(1)=3$ 。

图 11 为节点 1 对  $m_2(t)$  和  $m_3(t)$  的解调，其中  $m_2(t)$  和  $m_3(t)$  为节点 2 和节点 3 发送的原始信息信号， $m'_2(t)$  和  $m'_3(t)$  为节点 1 对解调后得到的节点

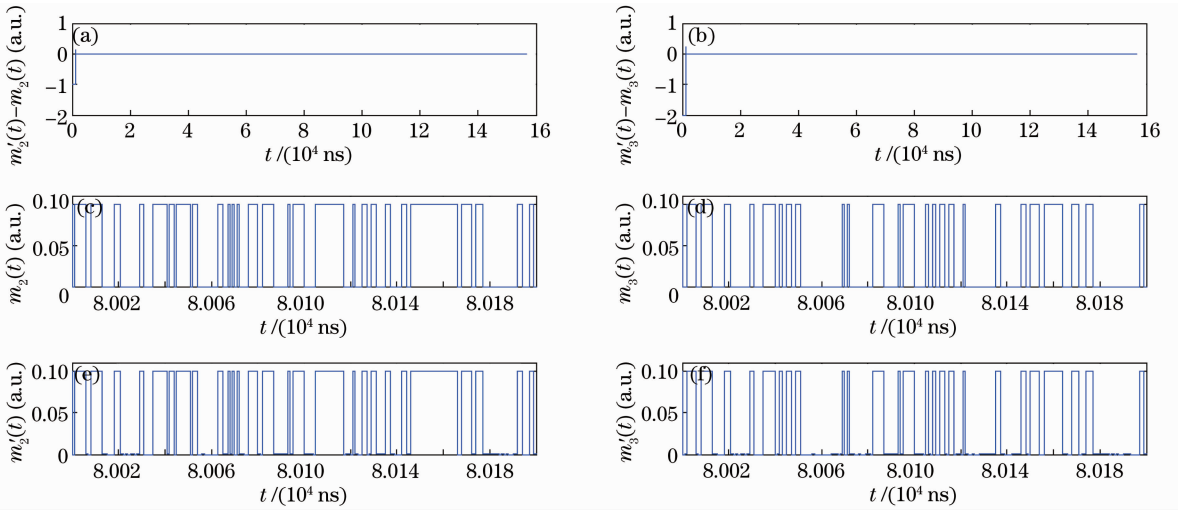


图 11 节点 1 对  $m_2(t)$  和  $m_3(t)$  的解调

Fig. 11 Demodulation of node 1 in the three nodes topology

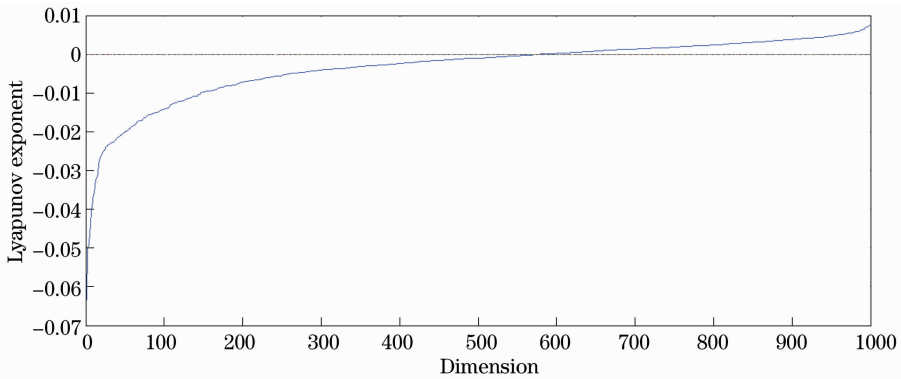


图 12 三个节点两两耦合时的李雅普诺夫指数

Fig. 12 Lyapunov exponent in the three nodes of mutually coupled structure

2 和节点 3 的信息信号,从图中可以看出:节点 1 可以对接收到的节点 2 和节点 3 的信息正确解码。

图 12 给出了三个节点两两耦合时的李雅普诺夫指数图,并可由(6)式计算出它的度量熵  $h = 1.2137$ ,与两个节点相互耦合时的李雅普诺夫指数(图 9)和度量熵  $h = 1.185$  比较可猜测,随着系统中节点数的增加,系统的混沌复杂度增加。

## 6 结 论

提出了一种新的基于光电反馈延迟的双向混沌通信系统,通过利用马赫-曾德尔调制器的非线性,引入了延迟时间,从而增加了系统的安全性和复杂性,并将这种系统拓展为满足一定拓扑结构的多点耦合混沌通信系统。以双向耦合系统为例,详细分析了系统的同步性能、安全性能、通信性能。分析结果表明,该系统在参数匹配时可以非常迅速地达到同步状态,系统的激光器光功率、信息信号功率、延迟时间、相位不匹配不会降低系统的同步性能,相

反,这几个参数可以作为密钥来提高系统的安全性。最后,将这种双向耦合结构拓展到了符合一定拓扑结构的多点耦合混沌通信系统,并以三点两两耦合的拓扑结构为例,分析了该系统的通信性能。

## 参 考 文 献

- 1 L M Pecora, T L Carroll. A secure communication scheme using projective chaos synchronization [J]. Phys Rev Lett, 1990, 45 (6): 821-824.
- 2 D W Sukow, A Gavrielides, T Erneux, *et al.*. Two-field description of chaos synchronization in diode lasers with incoherent optical feedback and injection [J]. Phys Rev A, 2005, 72(4): 043818.
- 3 Y Takeuchi, R Shogenji, J Ohtsubo. Chaos synchronization in semiconductor lasers with polarization-rotated optical feedback [J]. Opt Rev, 2010, 17(5): 467-475.
- 4 Liu Yujin, Zhang Shenghai, Yang Hua, *et al.*. Application in secret communication of chaos driving synchronization of vertical cavity surface emitting lasers with optical feedback [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0905004.  
刘玉金, 张胜海, 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在保密通信中的应用[J]. 中国激光, 2012, 39 (9): 0905004.
- 5 Y-Y Xie, Z-M Wu, T Deng, *et al.*. Nonlinear dynamics of



- 1550 nm VCSELs subject to positive optoelectronic feedback [J]. *Photon Technol Lett*, 2013, 25(16): 1605–1608.
- 6 Wang Chunhua, Li Li, Peng Lei, *et al.*. Polarization dynamics of an SOA-based fiber ring with polarization feedback [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0614003.  
王春华, 李立, 彭蕾, 等. 基于偏振反馈的半导体光放大器光纤环的动态偏振响应[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0614003.
- 7 Deng Lijun, Ke Xizheng, Shi Weijian. Performance research on the non-clipped QPSK sine-like modulation of atmospheric laser communication system [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0205001.  
邓莉君, 柯熙政, 史炜坚. 非限幅 QPSK 类正弦调制大气激光通信系统的性能研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0205001.
- 8 L Llling, G Hoth, L Shareshian. Scaling behavior of oscillations arising in delay-coupled optoelectronic oscillators [J]. *Phys Rev E*, 2011, 83(2): 026107.
- 9 T Deng, G Q Xia, L P Cao, *et al.*. Bidirectional chaos synchronization and communication in semiconductor lasers with optoelectronic feedback [J]. *Opt Commun*, 2009, 282(1): 2243–2249.
- 10 N Jiang, W Pan, L S Yan, *et al.*. Chaos Synchronization and communication in mutually coupled semiconductor lasers driven by a third laser [J]. *J Lightwve Technol*, 2010, 28(13): 1978–1986.
- 11 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.
- 12 P Li, J G Wu, Z M Wu, *et al.*. Simulation of bidirectional long-distance chaos communication performance in a novel fiber-optic chaos synchronization system [J]. *Opt Express*, 2011, 19(24): 23921–23931.
- 13 T Deng, H T Chen, X D Lin, *et al.*. Bidirectional chaos synchronization and communication based on mutually coupled semiconductor lasers with asymmetrical bias currents [J]. *Laser Physics*, 2012, 22(11): 1667–1672.
- 14 F Y Lin, M C Tsai. Chaotic communication in radio-over-fiber transmission based on optoelectronic feedback semiconductor lasers [J]. *Opt Express*, 2007, 15(2): 302–311.
- 15 D Kanakidis, A Bogris, A Argyris. Numerical investigation of fiber transmission of a chaotic encrypted message using dispersion compensation schemes [J]. *J Lightwave Technol*, 2004, 22(10): 2256–2263.
- 16 Alexandre Locquet. *Chaos-Based Secure Optical Communications Using Semiconductor Lasers* [M]. Berlin: Springer, 2010. 451–478.
- 17 Zhang Qiao, Pan Wei, Li Nianqiang, *et al.*. Investigation on security enhancement of chaotic optical communication systems via coupling delay [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0102009.  
张巧, 潘炜, 李念强, 等. 利用耦合时延增强激光混沌系统安全性能研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0102009.
- 18 J Doyne. Chaotic attractors of an infinite-dimensional dynamic system [J]. *Physical D: Nonlinear Phenomena*, 1982, 4(3): 366–393.
- 19 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.

栏目编辑：王晓琰