

文章编号: 1001-3806(2008)04-0445-04

## 信道串扰对多信道混沌通信系统的影响

李 丰, 潘 炜\*, 罗 斌, 陶 原, 江 宁, 邵宇挺  
(西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031)

**摘要:** 为了研究多信道全光混沌通信系统中信道串扰对系统同步及解码性能的影响, 构建了基于垂直腔面发射激光器的多信道混沌通信系统模型。通过利用描述其特性的速率方程模型, 采用相似指数作为参考标准来评价同步性能, 并进行了 2.5 Gbit/s 混沌掩藏方式的编解码数值模拟。结果表明, 相对注入强度越小, 信道间隔越大, 系统同步的性能越好; 双信道系统的同步质量相比主从式单信道系统会有明显下降, 而进一步增加信道数量, 同步品质并不发生显著改变。在同步质量足够高时, 信号可以得到较好的恢复。

**关键词:** 激光技术; 保密通信; 速率方程; 多信道; 信道串扰

**中图分类号:** TN248.4 **文献标识码:** A

### Effect of cross talk on multichannel chaotic optical communication systems

LI Feng, PAN Wei, LUO Bin, TAO Yuan, JIANG Ning, SHAO Yu-ting

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

**Abstract:** In order to study the effect of the cross talk on synchronization and decoding, a multichannel chaotic optical communication system was established based on vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs). Based on the corresponding rate equations, similarity index was used to evaluate the synchronization performance, and 2.5 Gbit/s message coding/decoding of chaotic masking method was numerically analyzed. The results show that the system can get better synchronization quality with less relative injection strength and more channel interval. The synchronization performance of dual-channel system decreases obviously compared with master-slave single channel system, and changes little when the channel number increases. The signals can be correctly recovered when the synchronization is good enough.

**Key words:** laser technique; secure communication; rate equations; multichannel; cross talk

### 引 言

自 PECORA 等人的混沌同步方案提出后<sup>[1]</sup>, 混沌在保密通信领域的应用受到了越来越多的关注, 各类混沌通信系统相继被提出并得到证实。通过引入附加自由度可以使激光器工作在混沌振荡下, 利用混沌信号的随机性以及初值和系统参量的高度敏感性, 有用信号可极好地隐藏于混沌载波中, 利用同步使接收系统复制发射激光器输出的混沌载波, 通过二者相减, 即可分离出调制信息。全光混沌系统有大的带宽和低的衰减, 且动力学系统复杂以及对参量具有极高的敏感性, 具有更高的保密性能, 非常适合高速远程保密通信。近年来, 人们对激光混沌通信方案的研究, 正在从

单一信道扩展到更大容量的多信道甚至波分复用混沌传输系统<sup>[2-3]</sup>。对提高信息容量, 充分利用光纤带宽资源也具有重要的意义。

对于光混沌保密通信系统, 在不同工作条件下, 可存在两类同步<sup>[4-5]</sup>: 全同步和普通同步。它们源于完全不同的物理机制, 对于多信道混沌通信系统, 无法满足全同步的条件, 只能利用强光注入使接收激光器锁定在某一信道光的模式下以实现同步<sup>[6-8]</sup>。然而, 由于多个信道的光耦合在一起注入接收激光器, 非同步信道势必会对同步性能产生影响。本文中基于多信道激光混沌同步系统, 建立描述其动力学特性的速率方程模型, 研究信道串扰对系统同步和解码性能的影响。

### 1 系统模型及数学描述

图 1 为全光多信道混沌保密通信系统示意图。发射系统由多个带外腔反馈的垂直腔面发射激光器 (vertical-cavity surface-emitting lasers, VCSELs) 组成, 它们工作在不同的中心波长, 合理选择反馈条件可使其在混沌振荡下。从发射激光器 1 (transmitting

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10174057); 教育部科学技术研究重点项目资助项目 (105148)

作者简介: 李 丰 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光混沌同步与通信的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: weipan80@sohu.com

收稿日期: 2007-05-08; 收到修改稿日期: 2007-09-10

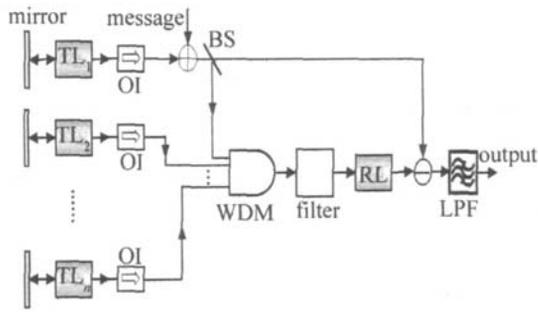


Fig 1 Schematic diagram of multichannel optical chaotic communication system

laser,  $TL$ ) 出来的混沌光经光隔离器 (optical isolator,  $OI$ ) 后, 以混沌掩藏方式与有用信号相加。同混沌载波相比, 有用信号强度非常低, 可极好地隐藏于载波中。编码后的混沌信号被光分束器 (beam splitter,  $BS$ ) 分为两束, 一束与其它信道的混沌光通过波分复用器 (wavelength division multiplexer,  $WDM$ ) 耦合进同一传输通道, 再由滤波器控制各个波长混沌信号的强度, 最后注入接收激光器 (receiving laser,  $RL$ ) 谐振腔中; 另一束与接收激光器输出信号相减, 以获取有用信息。最后通过巴特沃斯低通滤波器 (low pass filter,  $LPF$ ), 将高频成分从有用信号中滤除, 提高解码准确率。该系统的动力学特性可通过速率方程来描述。

发射激光器:

$$\frac{dP_{ti}(t)}{dt} = \left[ \Gamma_i \Gamma_z G_{ti} - \frac{1}{\tau_p} \right] P_{ti}(t) + \beta_{sp} B N_{ti}^2(t) + 2 \frac{k_{ext}}{\tau_{in}} \sqrt{P_{ti}(t) P_{ti}(t - \tau_{ext})} \cos[\theta_{ti}(t)] \quad (1)$$

$$\frac{d\phi_{ti}(t)}{dt} = \frac{1}{2} \beta_c \left[ \Gamma_i \Gamma_z G_{ti} - \left| \frac{1}{\tau_p} \right| \right] \frac{k_{ext}}{\tau_{in}} \frac{\sqrt{P_{ti}(t - \tau_{ext})}}{\sqrt{P_{ti}(t)}} \times \sin[\theta_{ti}(t)] \quad (2)$$

$$\frac{dN_{ti}(t)}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N_{ti}(t)}{\tau_c} - G_{ti} P_{ti}(t) \quad (3)$$

$$\dot{\theta}_{ti}(t) = \omega_{ti} \tau_{ext} + \phi_{ti}(t) - \phi_{ti}(t - \tau_{ext}) \quad (4)$$

接收激光器:

$$\frac{dP_r(t)}{dt} = \left[ \Gamma_r \Gamma_z G_r - \left| \frac{1}{\tau_p} \right| \right] P_r(t) + \beta_{sp} B N_r^2(t) + 2 \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{\tau_{in}} \sqrt{P_r(t) P_{ti}(t - \tau_{inj})} \cos[\theta_r(t)] \quad (5)$$

$$\frac{d\phi_r(t)}{dt} = \frac{1}{2} \beta_c \left[ \Gamma_r \Gamma_z G_r - \left| \frac{1}{\tau_p} \right| \right] - \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{\tau_{in}} \frac{\sqrt{P_{ti}(t - \tau_{inj})}}{\sqrt{P_r(t)}} \times \sin[\theta_r(t)] \quad (6)$$

$$\frac{dN_r(t)}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N_r(t)}{\tau_c} - G_r P_r(t) \quad (7)$$

$$\dot{\theta}_r(t) = -\Delta\omega_i t + \omega_{ti} \tau_{inj} + \phi_r(t) - \phi_{ti}(t - \tau_{inj}) \quad (8)$$

式中, 下标  $t, r$  分别代表发射和接收激光器,  $i$  表示属于不同的信道。  $P(t)$  是光子密度,  $\phi(t)$  是光场相位,

$N(t)$  是载流子密度,  $\Gamma_1$  和  $\Gamma_z$  分别为侧向和纵向光场限制因子,  $\tau_p$  是激光腔内光子寿命,  $\beta_c$  是线宽展宽因子,  $\beta_{sp}$  为自发辐射因子,  $B$  为辐射复合因子,  $V$  为有源区体积,  $t$  表示时间,  $I$  为激光器工作电流,  $q$  为电子电荷,  $\tau_c$  为载流子寿命。光增益  $G$  为广义对数形式  $G_{t,r} = v_g \alpha_N \log[N_{t,r}(t)/N_0]/[1 - \epsilon_{NL} P_{t,r}(t)]$ , 其中,  $v_g$  是群速度,  $\alpha_N$  为光增益系数,  $N_0$  为透明载流子密度,  $\epsilon_{NL}$  为增益压缩因子。  $k_{ext}$  是反馈参数, 表征反馈强度,  $\tau_{in}$  和  $\tau_{ext}$  分别为激光在内腔和外腔中传输一周所需时间,  $k_i$  是注入系数, 表征不同波长的光的注入强度,  $\tau_{inj}$  是注入延时, 并规定  $\tau_{inj} = 0$ 。  $\Delta\omega_i = \omega_{ti} - \omega_r$  是发射激光器与接收激光器的频率失谐。对于多信道系统,  $\Delta f = d|\Delta\lambda|/\lambda^2$ ,  $c$  表示光速。

仿真中所取的典型器件参量见文献 [5]。选取反馈条件为  $k_{ext} = 1 \times 10^{-3}$ ,  $\tau_{ext} = 2 \times 10^{-10}$  s, 作者期望  $RL$  与  $TL_1$  同步, 它们的中心波长都是 850nm, 注入强度为  $k_1 = 5 \times 10^{-2}$ 。其余发射激光器处于非同步信道, 且注入系数相同, 令  $\eta = k_m/k_1$  为相对注入强度, 其中  $m = 2, 3, \dots, n$ 。

通常, 同步品质可通过相关系数来量化:

$$\rho(\Delta t) =$$

$$\frac{\langle [P_r(t) - \langle P_r(t) \rangle][P_t(t - \Delta t) - \langle P_t(t) \rangle] \rangle}{\langle |P_r(t) - \langle P_r(t) \rangle|^2 \rangle^{1/2} \langle |P_t(t - \Delta t) - \langle P_t(t) \rangle|^2 \rangle^{1/2}} \quad (9)$$

式中,  $\langle \rangle$  表示时间平均,  $\Delta t$  为失配时间。文中,  $\Delta t = 0$  (最大相关系数) 为评估注入锁定同步时的情况。但是在相同的相位和频率条件下, 此系数不能精确反映波形的相似性。所以文中使用修正的参量——相似指数  $\mu$  来反映收发激光器输出的相似性:

$$\mu = \rho(0) - \left\langle \left| \frac{P_r(t) - \langle P_r(t) \rangle}{\max[P_r(t)]} - \frac{P_t(t) - \langle P_t(t) \rangle}{\max[P_t(t)]} \right| \right\rangle \quad (10)$$

## 2 仿真结果及分析

首先给出 3 信道混沌同步系统的时域波形以及发射与接收激光器的同步关系, 见图 2, 这里  $\eta = 0.1$ ,  $\Delta f = 100$  GHz, 中心波长的关系为  $\lambda_3 < \lambda_1 < \lambda_2$ 。虽然存在另外两个信道的干扰,  $RL$  与  $TL_1$  仍然建立了很好的同步。且从图中不难看出, 由于注入放大作用,  $RL$  的幅度明显强于  $TL_1$ , 属于普通同步。3 个信道中  $TL_1$  的输出在  $RL$  中占据主导作用, 从而使  $RL$  在其控制下按照完全相同的变化规律输出。此时,  $TL_2, TL_3$  的混沌信号并不是对  $RL$  完全没有影响, 只是相对  $TL_1$  的作用很小。下面将分析在不同信道串扰条件下系统的同步性能。

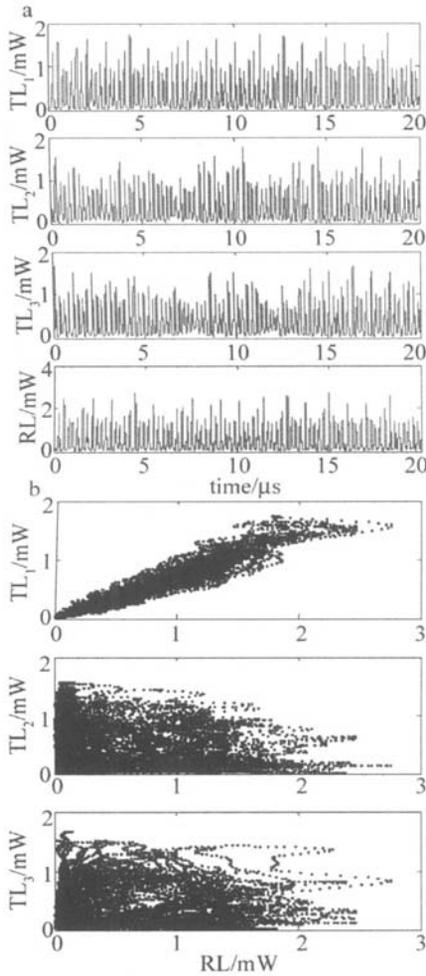


Fig 2 a—temporal variations of output power for transmit and receive lasers  
b—correlation plot of output power between transmit and receive lasers

图 3a 是 3 信道系统中不同信道间隔时  $TL_1$  与 RL

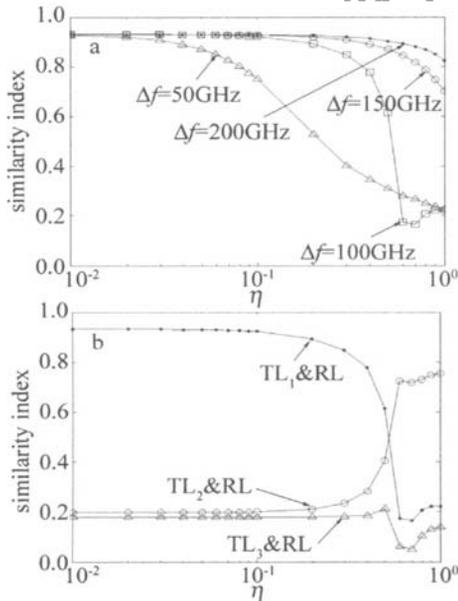


Fig 3 a—similarity index of  $TL_1$  and RL versus  $\eta$  b—similarity index of transmit and receive lasers versus  $\eta$ ,  $\Delta f=100GHz$

的相似指数随相对注入强度  $\eta$  的变化。 $\Delta f=50GHz$  时,信道间隔较小, $\mu$  随  $\eta$  的增大下降很快,同步质量受信道干扰影响显著;频率间隔增加, $\mu$  的下降趋势逐渐变缓。图 3b 是  $\Delta f=100GHz$  时 3 个发射激光器与 RL 的相似指数随  $\eta$  的变化。随  $\eta$  增加, $TL_2$  与 RL 输出波形的相似程度逐渐增大,并超过  $TL_1$  与 RL 的相似程度,此时, $TL_2$  取代了  $TL_1$  的主导地位,RL 被锁定在  $TL_2$  的模式下。而  $TL_3$  与 RL 的相似程度基本不发生改变,可见对同步性能影响较大的是波长较长的信道。

图 4a 是 3 信道系统中不同相对注入强度时  $TL_1$  与 RL 的相似指数随信道间隔  $\Delta f$  的变化。相同  $\eta$  的

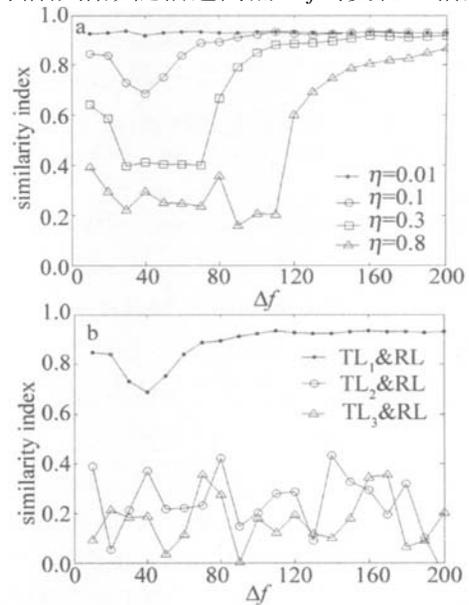


Fig 4 a—similarity index of  $TL_1$  and RL versus  $\Delta f$  b—similarity index of transmit and receive lasers versus  $\Delta f$ ,  $\eta=0.1$

情况下,随  $\Delta f$  的增大  $\mu$  先有小幅下降,当  $\Delta f$  增加到一定值后  $\mu$  也逐渐增大。并且  $\eta$  越大,要想获得足够好的同步性能,要求  $\Delta f$  也越大。当  $\eta$  很小时,如  $\eta=0.01$ , $\eta$  随  $\Delta f$  的增大波动很小。图 4b 是  $\eta=0.1$  时 3 个发射激光器与 RL 的相似指数随  $\Delta f$  的变化。由于此时  $TL_2$  和  $TL_3$  的注入强度较小,导致它们与 RL 的相似程度较低,并成不规则变化。

以上分析了与  $TL_1$  相邻两个信道的干扰对其同步性能的影响,对于更多信道系统的情况如图 5 所示。可以看出,在相同条件下,双信道系统的同步质量会有明显下降,而进一步增加信道数量,相似指数随之呈现小幅度起伏变化,同步品质并不发生显著改变。可见通过注入锁定实现普通同步对信道串扰具有一定的鲁棒性,在多信道系统中同样适用。如果动态的调节各发射激光器的注入强度,可以实现多信道的分时同步。

下面进一步分析多信道系统中信道串扰对系统编/解码性能的影响。这里以混沌掩藏加密方式为例

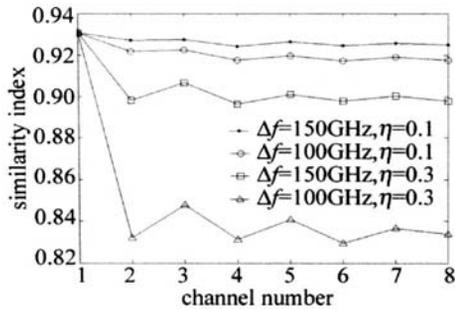


Fig 5 Similarity index of  $TL_1$  and  $RL$  versus channel number under different channel condition

进行分析。图 6a 为一组伪随机序列。序列比特率为

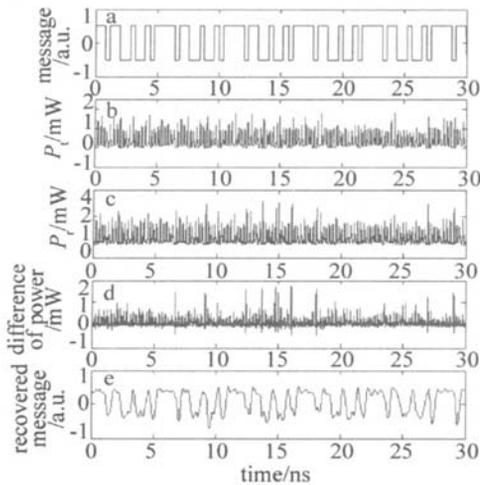


Fig 6 a—sent message b—transmitter output c—receiver output d—output difference of transmitter and receiver e—recovered message

光通信系统 OC-48 标准 2.5 Gbit/s。图 6b 为经编码后发送端输出的混沌信号。易见,有用信号很好地隐藏在混沌序列中。图 6c 为混沌同步下接收激光器输出的混沌信号。由于混沌滤波效应,该信号只与发送端混沌载波信号同步,因而可将两端激光器的输出相减来解出有用信号。图 6d 为两端激光器混沌输出的差值序列,通过添加合适带宽的低通滤波器后,可有效地将信号以外的高频成分滤除。如图 6e 所示,发送的信息很好的在接收端再现,从而实现了信息的解码。

最后,分析了不同信道串扰条件下 5 信道系统的解码性能,如图 7 所示。图 7b 和图 7e 的信号都得到了较好的恢复,而图 7d 和图 7f 的信号质量明显变差,出现误码情况。可以看出,信道间隔越小,相对注入强度越大,误码率越高,解码的性能越差,这与此时系统的同步性能是相一致的。

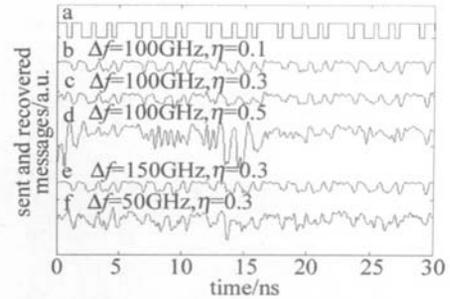


Fig 7 Recovered messages under different channel condition in 5-channel system

### 3 结论

构建了以垂直腔面发射激光器为光源的多信道全光混沌通信系统,建立了相应的速率方程模型。首先分析了信道间隔、相对注入强度,以及信道数量对同步的影响。强外光注入下的锁模同步对信道串扰具有一定的鲁棒性,合理的控制参量可以实现收发两端的混沌同步。再以 5 信道系统中 2.5 Gbit/s 伪随机调制下的混沌掩藏加密方式为例,研究了信道串扰对系统解码性能的影响。结果表明,发送端传送的信号可很好的隐藏于混沌载波中,通过注入锁定建立较好的同步后,在接收端亦可较好的得到恢复,系统解码性能与同步性能一致。

### 参考文献

- [1] PECORA L M, CARROLL T L. Synchronization in chaotic systems [J]. *Phys Rev Lett*, 1990, 64 (8): 821-824.
- [2] WHITE J K, MOLONEY J V. Multichannel communication using an infinite dimensional spatiotemporal chaotic system [J]. *Phys Rev*, 1999, A9 (3): 2422-2426.
- [3] PAUL J, SIVAPRAKASAM S, SHORE K A. Dual-channel chaotic optical communications using external-cavity semiconductor lasers [J]. *J O S A*, 2004, B21 (3): 514-521.
- [4] ZHANG W L, PAN W, LOU B, *et al*. Synchronization performance comparison of vertical-cavity surface-emitting lasers with two different feedback chaos schemes [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, 20 (8): 979-984.
- [5] LI X F, PAN W, MA D, *et al*. Effects of spontaneous emission noise in semiconductor lasers on chaotic optical communication systems [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55 (10): 5094-5104 (in Chinese).
- [6] MURAKAMI A. Phase locking and chaos synchronization in injection-locked semiconductor lasers [J]. *IEEE J Q E*, 2003, 39 (3): 438-447.
- [7] XIA G F, ZHAO B J, HAN Y Q. Chaotic weak signal detection in the long range laser rangefinders using neural network [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (5): 449-451 (in Chinese).
- [8] LIU Y, DAVIS P, TAKIGUCHI Y, *et al*. Injection locking and synchronization of periodic and chaotic signals in semiconductor lasers [J]. *IEEE J Q E*, 2003, 39 (2): 269-277.