

基于双光反馈垂直腔面发射激光器的双信道混沌同步通信*

邓伟 夏光琼 吴正茂[†]

(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2013年3月22日收到; 2013年4月15日收到修改稿)

利用双光反馈垂直腔面发射半导体激光器 (VCSELs) 两个正交偏振模式输出的两个混沌信号作为混沌载波, 构建了一个双信道的混沌保密通信系统, 并对该系统的通信性能进行了数值仿真研究. 研究表明: 通过合理的选取反馈参量, 双光反馈 VCSELs 两个偏振模式输出的混沌信号能很好地隐藏外腔反馈延时特性; 双光反馈 VCSEL 两个偏振模式输出的混沌信号通过偏振保持注入到接收 VCSEL 中, 在强注入锁定条件下可以实现很好的混沌同步, 同步性能对频率失谐的容忍性随着注入强度的增加而加强; 在附加混沌调制加密方式下, 500 Mbit/s 的信号在传输过程中能够得到很好的隐藏, 同时在接收端可以成功解调; 随着通信速率的增加, Q 因子呈现下降的趋势, 但对于 6 Gbit/s 的信息, Q 因子仍大于 6.

关键词: 垂直腔面发射激光器, 双光反馈, 双信道, 混沌通信

PACS: 42.55.Px, 05.45.Vx

DOI: 10.7498/aps.62.164209

1 引言

自 1990 年 Pecora 和 Carrol^[1] 证明了混沌信号可以实现同步以来, 混沌同步在保密通信传输中的应用受到了越来越多的关注. 由于半导体激光器在光反馈、光注入、光电反馈等外部扰动下很容易获得混沌输出, 因此基于半导体激光器的混沌同步以及保密通信的研究受到了国内外相关学者的格外关注^[2-17]. 其中, 光反馈外腔半导体激光器由于具有结构简单、易于实现两个以上正 Lyapunov 指数的超混沌输出被认为是最好的混沌发射源之一^[18]. 尽管基于单光反馈半导体激光器的混沌通信系统结构相对简单, 但是随着人们对延时系统分析技术的不断提高, 使得从激光器混沌输出中获得其外腔反馈延时时间从而对系统进行重构已成为可能^[19-21], 这无疑将使混沌通信的安全性受到威胁. 针对这一问题, 一些延时反馈特征得到抑制的

混沌信号产生方案相继被提出^[22-28]. 其中, 双光反馈半导体激光器混沌系统因其所产生的混沌信号能很好地隐藏外腔反馈延时特性^[22-25], 同时具有比单光反馈半导体激光器系统产生的混沌输出更高的关联维数和更宽的混沌带宽^[29], 因而受到特别关注. 最近, 基于双光反馈边发射半导体激光器 (EELs) 产生的优质混沌载波信号, Ding 等^[6] 构建了一个单向混沌同步通信系统, 该系统具有良好的通信性能.

作为一种微型芯片激光器, 垂直腔面发射激光器 (VCSELs) 相对于边发射半导体激光器 (EELs) 而言具有体积小、阈值电流低、发散角小、单纵模工作、易与光纤耦合、易集成等诸多优点, 因此在光通信、光互联和光存储等领域具有广阔的应用前景. 更为特别的是: 不同于 EELs, VCSELs 的有源区或腔存在微弱的各向异性导致其输出可能存在两个正交偏振模式. 通过引入外部扰动, 可使 VCSLEs 中的两个模式同时输出混沌信号. 利用这

* 国家自然科学基金 (批准号: 60978003, 61078003, 61178011, 61275116) 和重庆市自然科学基金 (批准号: 2012jjB40011) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zmwu@swu.edu.cn

两个混沌信号分别作为混沌载波, 将有望实现双信道混沌通信. 最近, Jiang 等^[17] 利用一个单光反馈 VCSEL 产生的双模混沌信号驱动两个 VCSELs, 在合适的条件下可使两个 VCSELs 达到双模共存且各偏振模式之间实现了混沌同步, 两个偏振模式的混沌输出分别作为载波可实现双信道通信.

考虑到双光反馈系统更有利于获取优质混沌载波信号这一特点, 本文利用一个双光反馈 VCSEL 作为混沌发射源, 与一个无反馈的接收 VCSEL 构成一个双信道开环混沌同步通信系统. 通过选取合适的反馈参数, 可使混沌发射源输出两个正交的外腔延时反馈特征抑制明显的混沌信号, 该混沌信号通过偏振保持注入到接收激光器中可使两 VCSELs 对应的两组偏振模式混沌信号实现同步. 在此基础上, 讨论了注入强度以及两 VCSELs 之间的频率差异对混沌同步的影响, 给出了该系统通信传输性能的数值仿真结果.

2 系统模型

图 1 为基于双光反馈 VCSELs 的双信道混沌同步通信系统的结构示意图. 发射激光器 (T-VCSEL) 的输出光经过分束器 BS1 分成两部分. 一部分经过反射镜 M2 反射后反馈回激光器中; 另一部分中的两个正交偏振模式被偏振分束器 (PBS1) 分开后分别作为混沌载波用于加载两个需要传输的信息. 两个加载了信息的混沌信号再通过一个 PBS2 合在一起后经过分束器 BS2 分成两部分. 一部分通过反射镜 M1 反射后反馈回激光器中; 另一部分通过 BS3 再分成两部分, 一部分偏振保持注入到 R-VCSEL 中, 而另一部分经过 PBS3 把两个线偏振模式进行分离, 分别与 R-VCSEL 输出的两个对应偏振模式进行强度相减, 从而实现信息的解调. 在该系统中, 中性密度衰减器 (NDF) 用来调节反馈或注入光强度.

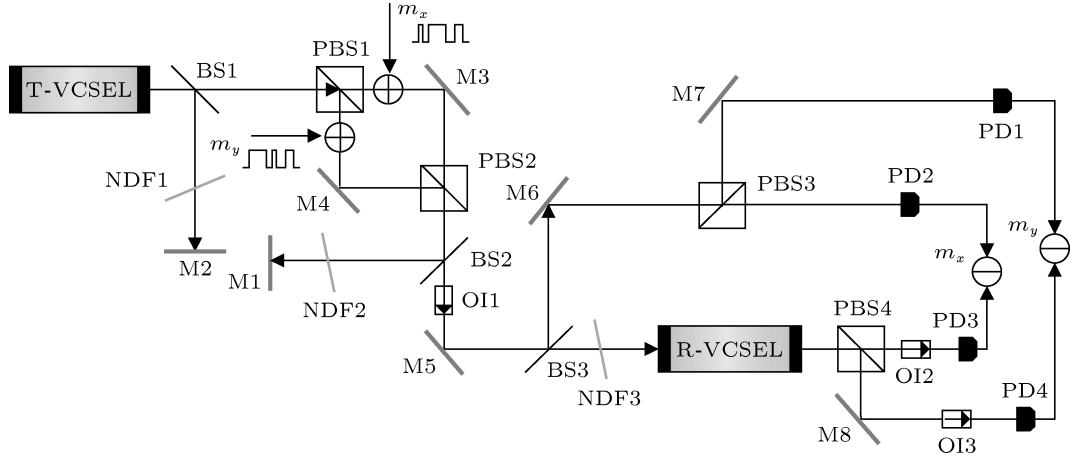


图 1 基于双光反馈 VCSELs 的双信道混沌同步通信系统模型 T-VCSEL 为发射激光器; R-VCSEL 为接收激光器; PBS 为偏振分束器; BS 为分束器; OI 为光隔离器; NDF 为中性密度衰减器; M 为反射镜; PD 为光电探测器

3 理论分析

基于自旋反转模型 (SFM)^[30], 双光反馈下 T-VCSEL 以及偏振保持光注入下 R-VCSEL 的速率方程为^[25,26]

$$\begin{aligned} \frac{dE_{x,y}^T}{dt} = & k(1+i\alpha)[(N^T-1)E_{x,y}^T \pm in^T E_{y,x}^T] \\ & \mp (\gamma_a + i\gamma_p)E_{x,y}^T + \sqrt{\beta_{sp}}\xi_{x,y} \\ & + f_1(1+m_{x,y})E_{x,y}^T(t-\tau_1)e^{-i\omega^T\tau_1} \\ & + f_2E_{x,y}^T(t-\tau_2)e^{-i\omega^T\tau_2}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{x,y}^R}{dt} = & k(1+i\alpha)[(N^R-1)E_{x,y}^R \pm in^R E_{y,x}^R] \\ & \mp (\gamma_a + i\gamma_p)E_{x,y}^R + \sqrt{\beta_{sp}}\xi_{x,y} \\ & + \eta E_{x,y}^T(t-\tau_c)e^{-i\omega^T\tau_c + i\Delta\omega t}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN^{T,R}}{dt} = & \gamma_n[\mu - N^{T,R}(1 + |E_x^{T,R}|^2 + |E_y^{T,R}|^2)] \\ & + in^{T,R}(E_x^{T,R}E_y^{T,R*} - E_y^{T,R}E_x^{T,R*}), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn^{T,R}}{dt} = & -\gamma_s n^{T,R} - \gamma_n[n^{T,R}(|E_x^{T,R}|^2 + |E_y^{T,R}|^2)] \\ & + iN^{T,R}(E_y^{T,R}E_x^{T,R*} - E_x^{T,R}E_y^{T,R*}), \end{aligned} \quad (4)$$

式中, 上标 T 和 R 分别表示 T-VCSEL 和 R-VCSEL,

下标 x 和 y 分别表示 x, y 两个线性偏振模式, 下标 1 和 2 分别代表反馈腔 1 和反馈腔 2; E 为激光器的慢变场振幅, N 为总的载流子密度, n 表示两个自旋反转载流子密度差值, k 为光场衰减率, α 为线宽增强因子, γ_n 为总的载流子衰减率, γ_s 为自旋反转速率, γ_a 和 γ_p 分别代表有源介质线性色散效应和双折射效应, f 为反馈系数, η 为注入强度, τ 表示反馈时间, $\mu = J/J_{th}$ 为归一化注入电流 (μ 在阈值时取 1); τ_c 为两个激光器之间的传输延迟时间, ω 为激光器的中心频率, $\Delta\omega = \omega^T - \omega^R$ 为两个激光器之间的频率失谐, β_{sp} 是自发辐射噪声强度, ξ_x 和 ξ_y 为两个的相互独立的高斯白噪声源, m_x, m_y 分别为加载到 x, y 偏振模式上的伪随机信号.

目前, 自相关函数、填充因子分析、互信息、局部线性模型等方法常用于分析光反馈混沌系统的延迟时间特征, 本文采用混沌时间序列的自相关函数谱来分析外腔反馈延时特性. 自相关函数定义为

$$C_s(\Delta t) = \frac{\langle (I(t+\Delta t) - \langle I(t) \rangle) (I(t) - \langle I(t) \rangle) \rangle}{\left(\langle (I(t) - \langle I(t) \rangle)^2 \rangle \langle (I(t+\Delta t) - \langle I(t) \rangle)^2 \rangle \right)^{1/2}}, \quad (5)$$

式中 $I(t)$ 代表混沌输出时间序列, Δt 代表移动时间, $\langle \cdot \rangle$ 表示对时间进行平均.

T-VCSEL 与 R-VCSEL 之间的同步性能由互相关函数表征, 互相关函数定义为

$$C_c(\Delta t) = \frac{\langle (I^T(t+\Delta t) - \langle I^T(t) \rangle) (I^R(t) - \langle I^R(t) \rangle) \rangle}{\left(\langle (I^T(t) - \langle I^T(t) \rangle)^2 \rangle \langle (I^R(t) - \langle I^R(t) \rangle)^2 \rangle \right)^{1/2}} \quad (6)$$

式中 $I^T(t)$ 和 $I^R(t)$ 分别代表 T-VCSEL 与 R-VCSEL 混沌输出时间序列.

另外, 系统的通信质量可通过 Q 因子来评估, Q 因子的定义为

$$Q = \frac{\langle P_1 \rangle - \langle P_0 \rangle}{\sigma_1 - \sigma_0}, \quad (7)$$

其中 $\langle \cdot \rangle$ 表示对时间求平均, P_1 和 P_0 分别表示比特“1”和比特“0”的功率, σ_1 和 σ_0 分别表示比特“1”和比特“0”的功率的标准差. Q 因子越高表示通信质量越好.

4 结果与讨论

利用四阶龙格-库塔法可对方程 (1)–(4) 进

行数值求解. 为了简便, 我们假定 T-VCSEL 与 R-VCSEL 具有相同的内部参量, 相关参数取值如下^[25,26]: $k = 300$ GHz, $\alpha = 3$, $\gamma_n = 1$ GHz, $\gamma_s = 50$ GHz, $\gamma_a = 0.5$ GHz, $\gamma_p = 30$ GHz, $\omega^T = 2.2176 \times 10^{15}$ (对应波长为 850 nm), $\beta_{sp} = 10^{-6}$ GHz.

4.1 外腔反馈延时特性

VCSELs 的有源区和腔存在微弱的各向异性导致其可能存在两个正交的偏振模式输出, 在合适的工作参数下 VCSELs 可以呈现双模共存. 图 2 为自由运行 VCSEL 中两偏振模式输出的 $P-I$ 曲线. 从图 2 中可以看出: 当 $1 < \mu < 1.1$ 时, 只有 y 模起振; 当 $1.1 < \mu < 2.7$ 时, x 模起振而 y 模被抑制; 当 $\mu > 2.7$ 时, x 模将占主导地位, 并和 y 模共存.

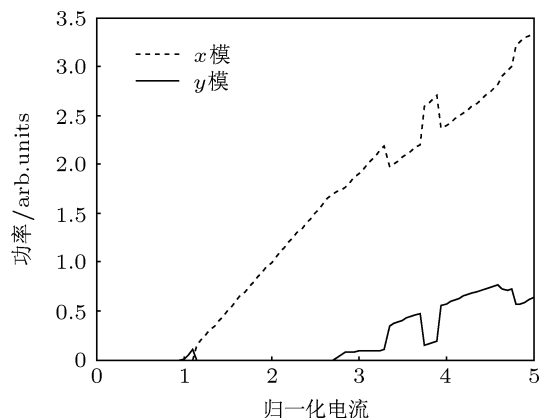


图 2 自由运行 VCSEL 的 $P-I$ 曲线 虚线代表 x 模; 实线代表 y 模

在以下计算中, 假定 T-VCSEL 以及 R-VCSEL 的归一化电流 $\mu = 4.5$, 并设定 T-VCSEL 两个外腔的反馈系数 $f_1 = f_2 = 5$ GHz, 其中一个外腔的反馈时间 $\tau_1 = 3$ ns. 根据我们前期的研究结果^[23], 当另一个外腔的反馈时间 $\tau_2 \approx \tau_1 + \tau_{RO}/2$ (其中 $\tau_{RO} = 2\pi(2k\gamma_n(\mu - 1))^{-1/2}$ 为激光器的弛豫振荡周期) 可得到较好的外腔特征抑制效果. 利用前面所给的数据, 可计算出 $\tau_1 + \tau_{RO}/2$ 的值为 3.07 ns. 通过比较 τ_2 在 3.07 ns 附近取不同值时所得到的混沌信号的延时特性, 发现当 $\tau_2 = 3.0686$ ns 可得到最佳的延时特征抑制效果. 图 3 给出了上述参数情况下 T-VCSEL 两个偏振模式的功率谱和对应的自相关函数谱. 从图中可以看出功率谱较为平滑, 同时自相关曲线上外腔反馈延迟时间处未见明显的峰值, 说明 T-VCSEL 的两个偏振模式输出的混沌信号已很好地隐藏了外腔延时反馈特征.

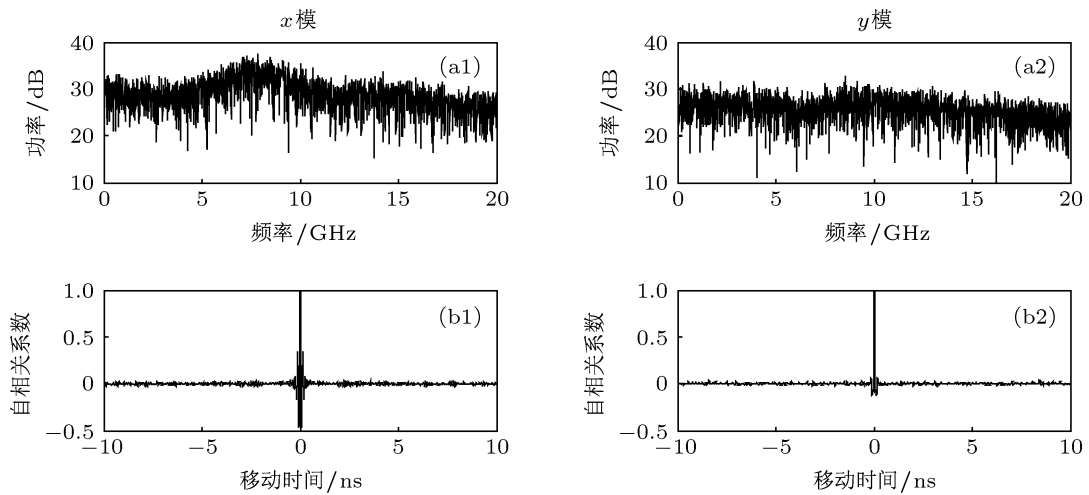


图3 双光反馈下 T-VCSEL 两偏振模式输出的功率谱 (a1, a2) 及相应的自相关函数谱 (b1, b2)

4.2 混沌同步

本文主要讨论强注入锁定下的滞后混沌同步. T-VCSEL 输出的混沌信号通过偏振保持单向耦合到 R-VCSEL. 图 4 给出了注入强度 $\eta = 100$ GHz, 传输时间 $\tau_c = 1$ ns 时, T-VCSEL 与 R-VCSEL 的 x , y 两个偏振模式的时间序列图 4(a) 和 (b) 以及互相关曲线图 4(c). 从图 4(c) 可以看出, T-VCSEL 和 R-VCSEL 中两个偏振模式的互相关系数的最大值均超过 0.97, 说明该系统能实现很好的混沌同步. 此外, 通过对比各偏振模式输出的时间序列以及观察

互相关曲线呈现最大值的位置可以看出: R-VCSEL 相比于 T-VCSEL 的滞后时间刚好等于从 T-VCSEL 到 R-VCSEL 的传输时间 1 ns, 即为强注入锁定下的滞后混沌同步.

下面讨论注入强度和收、发激光器之间的频率失谐对系统同步性能的影响. 图 5 给出了 T-VCSEL 和 R-VCSEL 之间对应模式的互相关系数在注入强度以及频率失谐 $\Delta\omega$ 构成的参数空间的分布图. 从图中可以看出, 随着注入强度的增加, 系统的同步性也随之增加, 同时对频率失谐具有更强的容忍性.

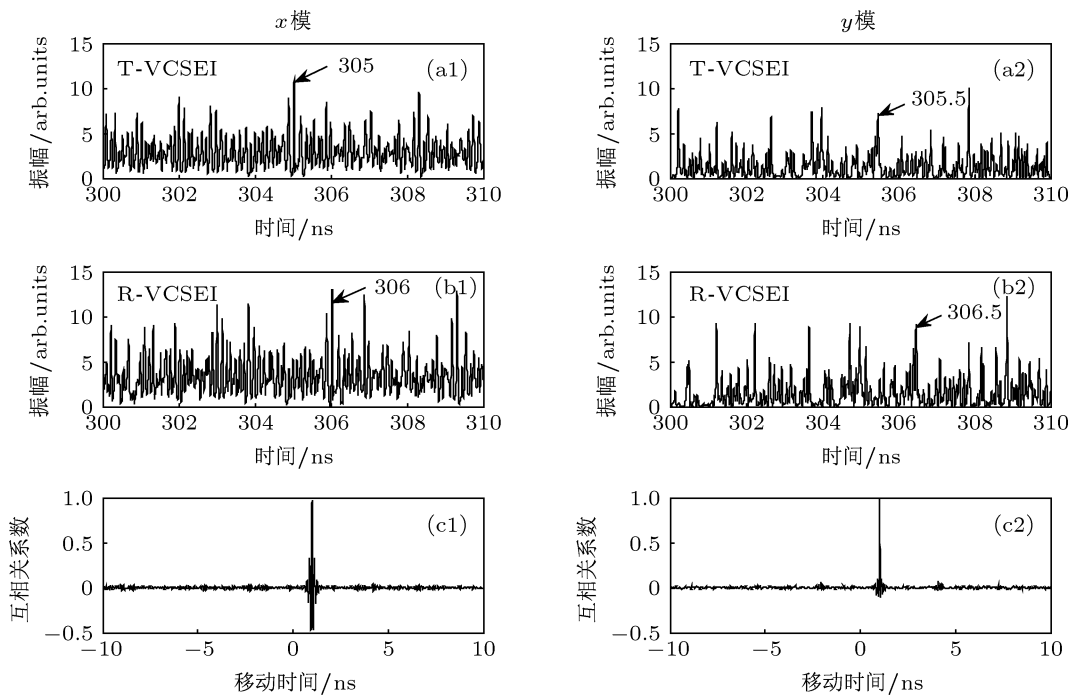


图4 注入强度 $\eta = 100$ GHz, 传输时间 $\tau_c = 1$ ns 时, T-VCSEL 和 R-VCSEL 的时间序列 (a) 和 (b) 以及互相关函数曲线 (c)

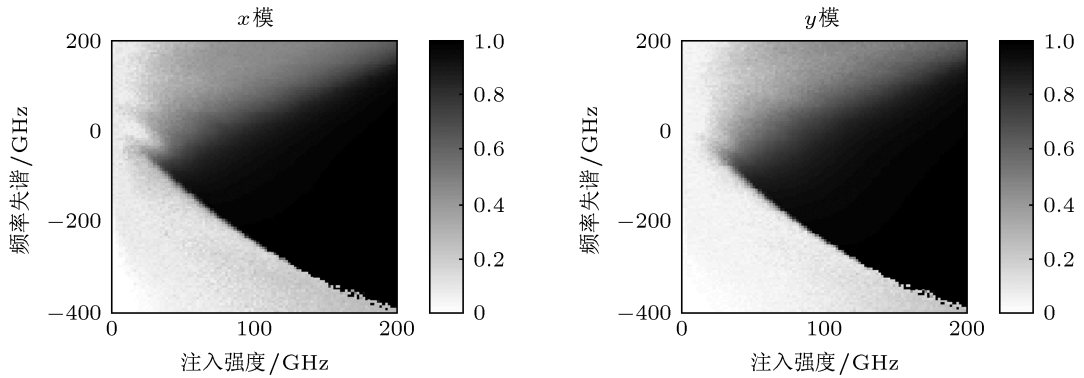


图5 T-VCSEL 和 R-VCSEL 各对应模式之间的互相关系数随注入强度以及频率失谐的变化

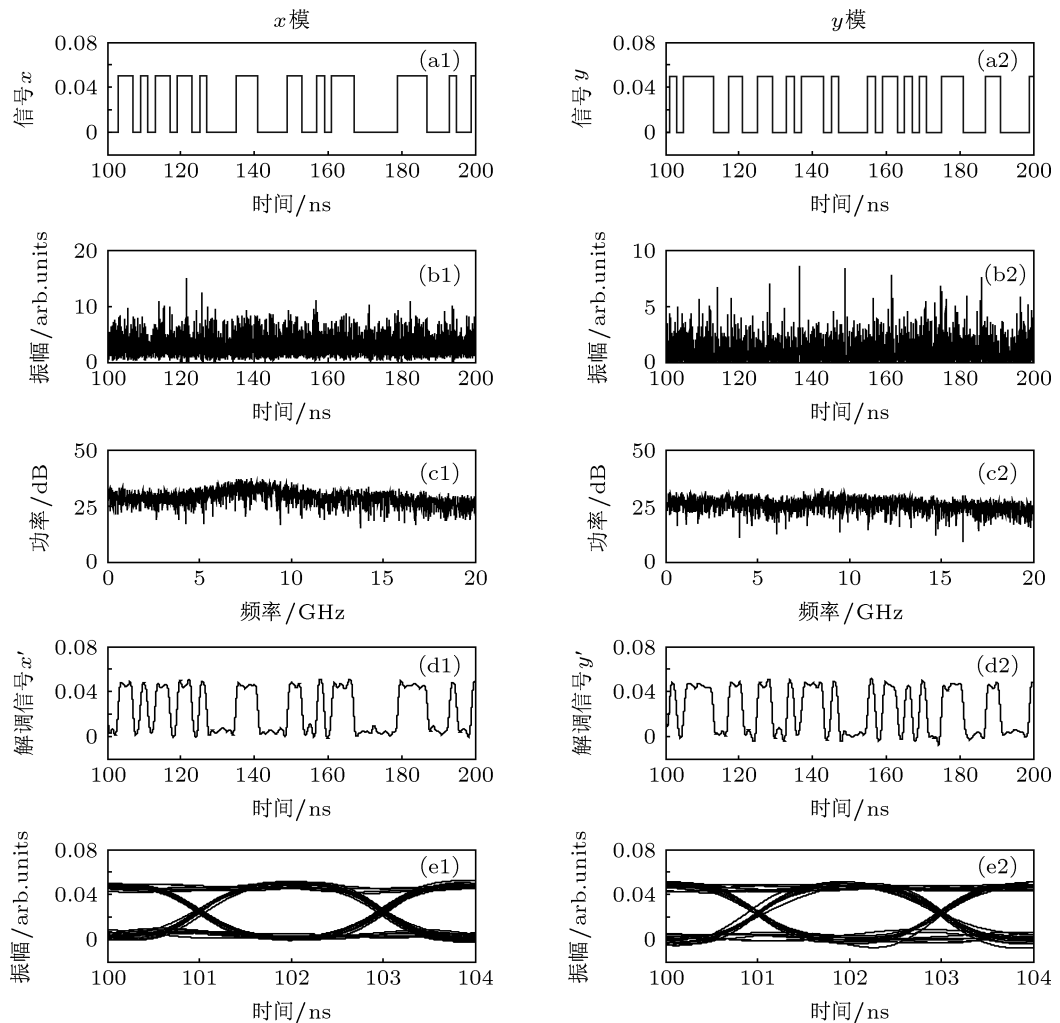


图6 两个信道中信息的加载与解调 (a) 为加载的伪随机比特序列; (b), (c) 分别为加载了信号后的混沌时间序列以及相应的功率谱; (d), (e) 为解调信号及其眼图

4.3 信息的加载与解调

利用 T-VCSEL 输出的两个正交偏振模式分别作为混沌载波, 可实现双信道混沌保密通信. 在本文中, 我们采用附加混沌调制 (ACM) 方式进行

信号加载 (见图 1 所示). 此时, 信号不仅注入到 R-VCSEL 中, 同时通过其中一个外腔反馈也进入到 T-VCSEL 中. 图 6 给出了两 500 Mbit/s 随机方波信号 (图 6(a1), (a2)) 以 5% 的调制深度分别加载到 T-VCSEL 的 x 模和 y 模两个混沌载波上系统的

通信性能. 加载信息后的混沌输出时间序列以及相应的功率谱如图 6(b) 和 (c) 所示, 此时, 信号能很好地隐藏在混沌载波中. 解调信号以及对应的眼图如 6(d) 和 (e) 所示, 相应的两个信道的 Q 因子为 14 左右, 结果显示该系统具有良好的通信质量.

图 7 给出了两个信道中 Q 因子随信息传输

速率的变化曲线以及信息传输速率分别为 1, 3, 5 Gbit/s 时两个信道解码后的眼图. 从图 7 中可以看出: 随着信息传输速率的增加, Q 因子呈下降趋势, 眼图的质量也随之下降. 但对于速率为 6 Gbit/s 的信息, Q 因子仍能保证在 6 以上.

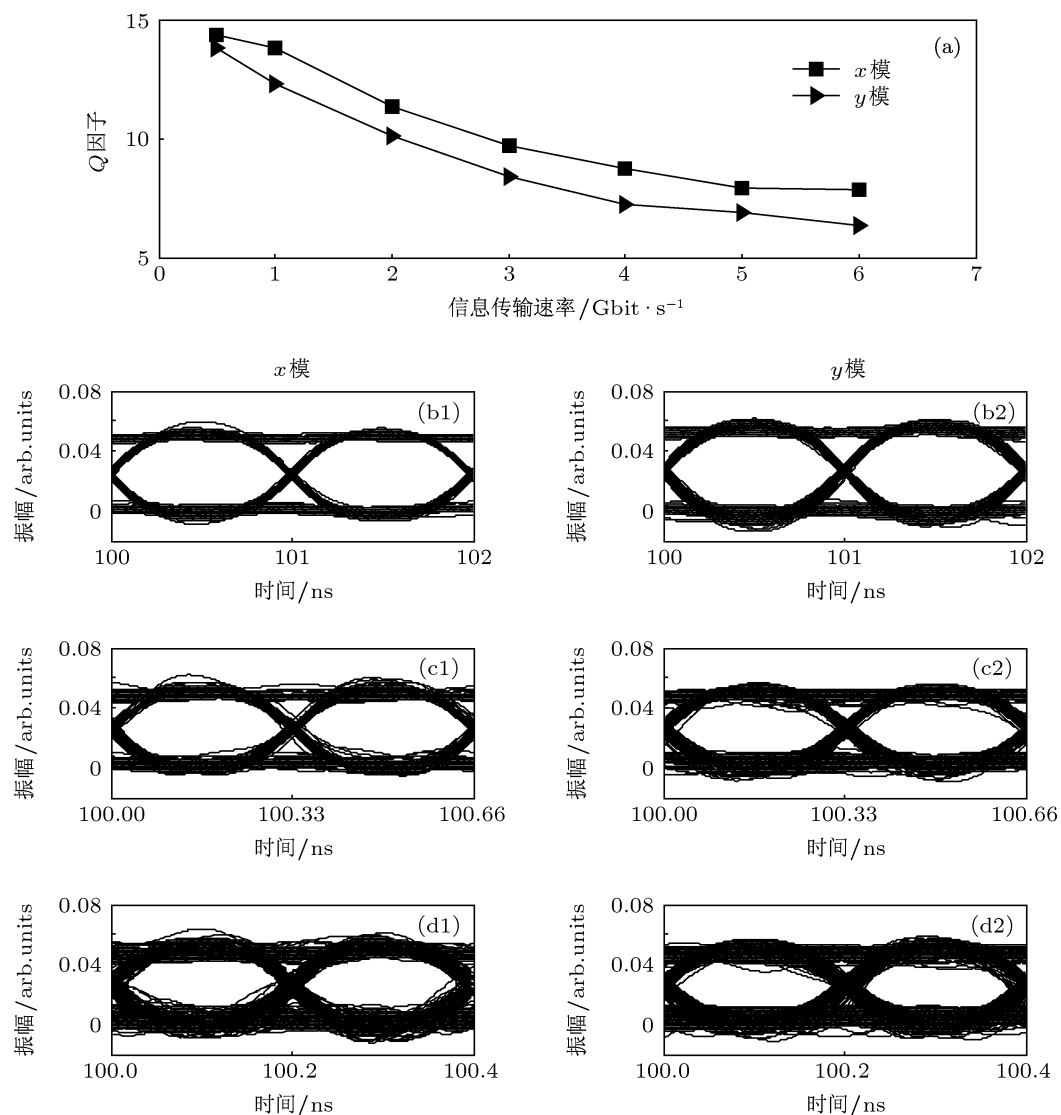


图 7 (a) 两个信道中 Q 因子随信息传输速率的变化曲线; (b), (c), (d) 分别对应信息传输速率为 1, 3, 5 Gbit/s 时两个信道解码后的眼图

5 结论

本文基于两个垂直腔面发射半导体激光器 (VCSELs) 构建了一个双信道单向混沌通信系统, 并对双腔反馈作用下 T-VCSEL 所产生的混沌载波的延迟特性、系统的混沌同步通信性能等进行了研究. 结果表明: 通过控制 T-VCSEL 的工作参量, 可使 T-VCSEL 同时输出两个线偏振模式 (x 模

和 y 模); 引入双光反馈后, 通过调整反馈参量, 可使两个模式均呈现隐藏了外腔反馈延时特征的混沌输出; 在强注入锁定的条件下, T-VCSEL 与 R-VCSEL 对应两个模式之间能够实现很好的混沌同步, 系统的同步性能对 T-VCSEL 和 R-VCSEL 之间频率失谐的容忍性随着注入强度的增加而加强; 两个 500 Mbit/s 的随机信号分别加载到两个混沌载波中, 信号在两个信道中均能得到很好的隐藏, 同

时在接收端可以得到良好解调;随着信息传输速率的增加, Q 因子逐渐下降,但对于 6 Gbit/s 的传输信

息,两信道的 Q 因子仍可保证在 6 以上.

- [1] Pecora L M, Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [2] Argyris A, Syvridis D, Larger L, Annovazzi-Lodi V, Colet P, Fischer I, García-Ojalvo J, Mirasso C R, Pesquera L, Shore K A 2005 *Nature* **438** 343
- [3] Masoller C 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 2782
- [4] Xia G Q, Wu Z M, Wu J G 2005 *Opt. Express* **13** 3445
- [5] Rogister F, Locquet A, Pieroux D, Sciamanna M, Deparis O, Mégret P, Blondel M 2001 *Opt. Lett.* **26** 1486
- [6] Ding L, Wu Z M, Wu J G, Xia G Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 014212 (in Chinese) [丁灵, 吴正茂, 吴加贵, 夏光琼 2012 物理学报 **61** 014212]
- [7] Torre M S, Masoller C, Shore K A 2004 *J. Opt. Soc. Am. B* **21** 1772
- [8] Gatare I, Sciamanna M, Locquet A, Panajotov K 2007 *Opt. Lett.* **32** 1629
- [9] Hong Y H, Lee M W, Paul J, Spencer P S, Shore K A 2008 *Opt. Lett.* **33** 587
- [10] Hong Y H, Lee M W, Spencer P S, Shore K A 2004 *Opt. Lett.* **29** 1215
- [11] Sciamanna M, Gatare I, Locquet A, Panajotov K 2007 *Phys. Rev. E* **75** 056213
- [12] Xiang S Y, Pan W, Yan L S, Luo B, Zou X H, Jiang N, Yang L 2011 *Opt. Lett.* **36** 3497
- [13] Zhang W L, Pan W, Luo B, Li X F, Zou X H, Wang M Y 2006 *Opt. Rev.* **13** 443
- [14] Locquet A, Masoller C, Mirasso C R 2002 *Phys. Rev. E* **65** 056205
- [15] Yan S L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2819 (in Chinese) [颜森林 2008 物理学报 **57** 2819]
- [16] Guo D M, Yang L Z, Wang A B, Zhang X J, Wang Y C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8275 (in Chinese) [郭东明, 杨玲珍, 王安邦, 张秀娟, 王云才 2009 物理学报 **58** 8275]
- [17] Jiang N, Pan W, Luo B, Xiang S Y, Yang L 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1094
- [18] Vicente R, Daudén J, Colet P, Toral R 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 541
- [19] Bezruchko B P, Karavaev A S, Ponomarenko V I, Prokhorov M D 2001 *Phys. Rev. E* **64** 056216
- [20] Hegger R, Büchner M J, Kantz H, Giaquinta A 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 558
- [21] Kouomou Y C, Colet P, Larger L, Gastaud N 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 156
- [22] Lee M W, Rees P, Shore K A, Ortin S, Pesquera L, Valle A 2005 *IEE Proc. Optoelectron.* **152** 97
- [23] Wu J G, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Opt. Express* **17** 20124
- [24] Ding L, Wu J G, Xia G Q, Shen J T, Li N Y, Wu Z M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014210 (in Chinese) [丁灵, 吴加贵, 夏光琼, 沈金亭, 李能尧, 吴正茂 2011 物理学报 **60** 014210]
- [25] Xiao P, Wu Z M, Wu J G, Jiang L, Deng T, Tang X, Fan L, Xia G Q 2013 *Opt. Commun.* **286** 339
- [26] Xiang S Y, Pan W, Luo B, Yan L S, Zou X H, Jiang N, Yang L, Zhu H N 2011 *Opt. Commun.* **284** 5758
- [27] Wu J G, Wu Z M, Tang X, Lin X D, Deng T, Xia G Q, Feng G Y 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 759
- [28] Wu J G, Wu Z M, Xia G Q, Feng G Y 2012 *Opt. Express* **20** 1741
- [29] Zhao Y F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6058 (in Chinese) [赵严峰 2009 物理学报 **58** 6058]
- [30] Regalado J M, Prati F, Miguel M S, Abraham N B 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 765

Dual-channel chaos synchronization and communication based on a vertical-cavity surface emitting laser with double optical feedback*

Deng Wei Xia Guang-Qiong Wu Zheng-Mao[†]

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

(Received 22 March 2013; revised manuscript received 15 April 2013)

Abstract

Using two orthogonal polarization mode outputs from a vertical-cavity surface emitting lasers (VCSEL) with double optical feedback as two chaotic carriers, a dual-channel chaos secure communication system is established, and the synchronization and communication performances of such a system are numerically investigated. The results show that under suitable operated condition, the time-delay signatures of two chaotic carriers originating from two linear polarization modes in the T-VCSLE with double optical feedback can be suppressed efficiently. Under the strong injection locking case, high-quality chaos synchronization between two corresponding modes of T-VCSEL and R-VCSEL can be realized by polarization-preserved optical injection from T-VCSEL to R-VCSEL. Moreover, the tolerance of the synchronization quality on the frequency detuning between T-VCSEL and R-VCSEL is enhanced with the increase of the injection strength. Adopting additive chaos modulation encryption scheme, two pieces of 500 Mbit/s encoded message can be hidden efficiently in the two chaotic carriers in the propagation process and can be successfully extracted at the receiver. Although Q factor decreases with the increase of message transmission rate, the values of Q factor for two channels are still larger than 6 for 6 Gbit/s message.

Keywords: vertical-cavity surface emitting lasers, double optical feedback, dual-channel, chaos communication

PACS: 42.55.Px, 05.45.Vx

DOI: 10.7498/aps.62.164209

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978003, 61078003, 61178011, 61275116) and the Natural Science Foundation of Chongqing City, China (Grant No. 2012jjB40011).

[†] Corresponding author. E-mail: zmwu@swu.edu.cn