

基于 1550 nm 垂直腔面发射激光器的长距离双向双信道光纤混沌保密通信研究*

赵艳梅 夏光琼 吴加贵 吴正茂†

(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2013 年 6 月 4 日收到; 2013 年 6 月 24 日收到修改稿)

基于同一混沌信号光注入下两个 1550 nm 垂直腔面发射激光器 (VCSELs) 中两对应线性偏振模式之间的混沌同步, 提出了一种可实现信息的长距离双向双信道光纤混沌保密通信的系统模型, 并对该系统的同步、双向双信道通信以及光纤信道对信息传输的影响等性能进行了相关仿真研究. 结果表明: 在由驱动混沌激光器所产生的同一混沌光注入下, 两响应激光器中对应的两线偏振模式之间均可实现高质量的等时混沌同步, 且驱动激光器与两响应激光器间的同步系数较低; 基于两响应激光器之间对应线偏振模式的高质量混沌同步, 可实现双向双信道混沌通信; 采用单模保偏光纤 (或色散位移保偏光纤) 作为通信信道, 2.5 Gbit/s 信息在传输 60 km (或 200 km) 后解调信息的 Q 因子能保持在 6 以上.

关键词: 垂直腔面发射激光器 (VCSELs), 双向双信道, 混沌通信, 光纤

PACS: 42.55.Px, 05.45.Vx

DOI: 10.7498/aps.62.214206

1 引言

Pecora 和 Carroll 在 1990 年提出并验证了混沌同步^[1], 使得混沌用于信息的保密传输成为可能. 由于半导体激光器 (SLs) 具有高调制带宽以及与现有光纤系统的良好兼容性等优点, 因此基于 SLs 的激光混沌同步的保密通信逐渐成为混沌保密通信领域的研究热点^[2-15]. 在 2005 年, Argyris 等人实现了 1 Gbit/s 信息在 120 km 的商用光纤网络中的单向混沌保密传输^[6], 很好的验证了基于光纤实现信息的单向、长距离混沌保密传输的可行性. 显然仅仅实现信息的单向长距离混沌保密传输是不够的, 信息的双向甚至多向的长距离传输是混沌保密通信技术发展的必然趋势.

近年来关于双向混沌保密通信的方案相继被学者们提出^[13-23], 这些方案按系统构架可分为以下两类. 第一类: 基于两个直接耦合的 SLs 之间的混沌同步实现信息的双向保密传输^[13-16], 如 Zhang 等^[14] 从理论上论证了通过两个耦合激光

器之间的同步实现了信息的双向传输的可能性; Deng 等^[15] 利用光电互耦 SLs 系统论证了实现双向通信的可能性等. 第二类: 在驱动混沌激光器所产生的混沌光注入下, 两个响应激光器达到混沌同步从而实现信息的双向保密传输^[17-23], 如 Wu 等人在 2011 年实验实现了距离为 40 km 的两个响应激光器在驱动激光器的驱动下的等时混沌同步^[19], 并在 2013 年实现了误码率低于 10^{-4} 的两个 2.5 Gbit/s 信号相向 10 km 混沌保密传输^[20]. 就目前的研究而言, 基于 SLs 的双向混沌保密通信大多基于边发射半导体激光器 (EELs) 来实现, 而基于垂直腔面发射激光器 (VCSELs) 的双向混沌保密通信的研究还比较缺乏.

与 EELs 相比, VCSELs 具有阈值电流低、发散角小、单纵模光输出、易于与光纤耦合以及易于集成等优势. 特别是 VCSELs 在一定条件下可同时输出两个正交的偏振混沌信号, 因此提供了一种可以实现双信道混沌保密通信的可能性^[10,23]. 如 Liu 等^[10] 提出可利用一个偏振旋转反馈的 VCSEL 中两个偏振模式输出的混沌光注入到另一个 VCSEL

* 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

中使两个 VCSELs 的各对应线偏振模式实现混沌同步, 从而可实现信息的单向双信道混沌保密通信. Jiang 等 [23] 提出利用一个光反馈 VCSEL 中正交偏振模式输出的混沌信号驱动两个响应 VCSELs, 基于两个响应 VCSELs 各对应偏振模式之间的混沌同步从而可实现双向双信道混沌保密通信. 目前, 基于 VCSELs 的双向、双信道混沌保密通信方面的研究还处于初步阶段, 主要集中在信息的短距离传输 [10,23], 未考虑长距离光纤对信息传输的影响. 基于此, 本文提出了一个基于激光波长位于商用光纤低损耗窗口的两个 1550 nm VCSELs 之间各对应线偏振模式之间的高质量混沌同步实现信息的双向双信道长距离混沌保密通信的系统方案, 并对该系统的同步性能、双向双信道通信性能、安全性以及光纤信道对信息传输的影响等方面开展了相关研究.

2 系统结构与理论模型

双向双信道长距离光纤混沌通信系统的结构示意图如图 1 所示. 在合适的反馈条件下, 偏振保持光反馈下的 1550 nm 波段驱动 VCSEL (D-VCSEL) 中两个线偏振模式 (X 线偏振模式和 Y 线偏振模式, 简称 X-LP 和 Y-LP) 均可呈现混沌输出. 将 D-VCSEL 的混沌输出经光纤耦合器 (FC) 分成两部分, 一部分经光纤链路 F_1 注入到一个 1550 nm 的响应 VCSEL₁ (R-VCSEL₁), 另一部分经光纤链路 F_2 注入到另一个 1550 nm 响应 VCSEL₂

(R-VCSEL₂). 当光纤链路 F_1 与光纤链路 F_2 保持对称且 R-VCSEL₁ 和 R-VCSEL₂ 具有相似的内部参数时, 在合适的工作条件下, D-VCSEL 产生的混沌光注入可使 R-VCSEL₁ 和 R-VCSEL₂ 均呈现双模共存, 且各对应线偏振模式之间能达到高质量的混沌同步. 基于 R-VCSEL₁ 和 R-VCSEL₂ 之间各对应线偏振模式的混沌同步, 可实现信息的双向双信道混沌保密传输. 信息的加载和解调过程如下: 如图 1 所示, 从 R-VCSEL₁ 输出的混沌信号, 经过偏振分束器 (PBS₁) 后分成 X-LP 模和 Y-LP 模. 其中, X-LP 模的混沌输出经 FC 分成两部分, 其中一部分作为信息 m_1 的混沌载波, 另一部分用于解调信息 m_3 . 信息 m_1 经过混沌调制 (CM) 方式 [20] 加载到混沌信号中. 加载了信息 m_1 的混沌信号经偏振控制器 (PC)、光环行器 (OC), 到达 PBS₃ 处与 R-VCSEL₁ 输出 Y-LP 模经过相似步骤混合了信息 m_2 的混沌信号合并后进入光纤链路 F_3 进行长距离传输, 最终到达 R-VCSEL₂ 的前端, 完成了两信息的双信道混沌保密传输. 在 R-VCSEL₂ 前端, 携带 m_1 或 m_2 两个不同偏振方向的混沌信号被 PBS₄ 分离出来, 并分别经过一个光电探测器 (PD) 转换成电信号后送入到减法器中, 与来自 R-VCSEL₂ 未携带信息的相应 LP 模的混沌信号经过 PD 后的电信号进行相减, 并进行滤波处理即可解调出信息 m_1 和 m_2 . 而对于需要从 R-VCSEL₂ 传输到 R-VCSEL₁ 的信息 m_3 和 m_4 , 采用相似的过程进行信息的加载和解调. 因此, 该系统利用双向双信道的方式能同时实现四个不同的信息 (m_1, m_2, m_3 和 m_4) 的混沌保密传输.

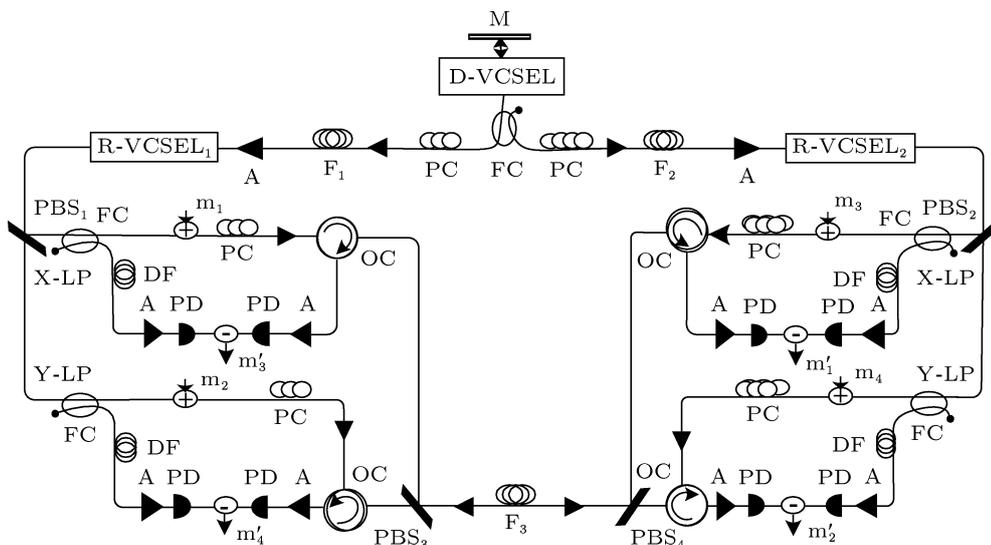


图 1 双向双信道长距离光纤混沌通信系统结构示意图 (M: 反射镜; D-VCSEL: 驱动激光器; FC: 光纤耦合器; PC: 偏振控制器; F: 光纤; A: 光放大器; R-VCSEL: 响应激光器; PBS: 偏振分束器; OC: 光环行器; DF: 延时光纤; PD: 光电探测器; m: 调制信号; m': 解调信号; X-LP: X 线偏振模式; Y-LP: Y 线偏振模式)

基于自旋反转模型 (SFM)^[24], 系统中各 VCSEL 的速率方程可表示为

$$\begin{aligned} \frac{dE_{x,y}^D}{dt} = & \kappa^D(1+i\alpha^D)[(N^D-1)E_{x,y}^D \pm in^D E_{y,x}^D] \\ & \pm (-\gamma_a^D - i\gamma_p^D)E_{x,y}^D + fE_{x,y}^D(t-\tau_1) \\ & \times \exp(-i2\pi\nu^D\tau_1) + F_{x,y}^D, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{x,y}^{1,2}}{dt} = & \kappa^{1,2}(1+i\alpha^{1,2})[(N^{1,2}-1)E_{x,y}^{1,2} \pm in^{1,2} E_{y,x}^{1,2}] \\ & \pm (-\gamma_a^{1,2} - i\gamma_p^{1,2})E_{x,y}^{1,2} \\ & + \eta E_{x,y}^D(t-\tau_2) \exp(-i2\pi\nu^D\tau_2) \\ & + i2\pi\Delta\nu^{D1,D2}t + F_{x,y}^{1,2}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN^{D,1,2}}{dt} = & -\gamma^{D,1,2}[N^{D,1,2} - \mu^{D,1,2} \\ & + N^{D,1,2}(|E_x^{D,1,2}|^2 + |E_y^{D,1,2}|^2)] \\ & - i\gamma^{D,1,2}n^{D,1,2}(E_y^{D,1,2}E_x^{D,1,2*} \\ & - E_x^{D,1,2}E_y^{D,1,2*}), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn^{D,1,2}}{dt} = & -\gamma_s^{D,1,2}n^{D,1,2} - \gamma^{D,1,2}n^{D,1,2} \\ & \times (|E_x^{D,1,2}|^2 + |E_y^{D,1,2}|^2) \\ & - i\gamma^{D,1,2}N^{D,1,2}(E_y^{D,1,2}E_x^{D,1,2*} \\ & - E_x^{D,1,2}E_y^{D,1,2*}), \end{aligned} \quad (4)$$

式中, 下标 x, y 分别表示 X-LP 模和 Y-LP 模, 上标 D, 1 和 2 分别表征 D-VCSEL, R-VCSEL₁ 和 R-VCSEL₂. N 表示导带和价带总的载流子数目, n 表示自旋向上和自旋向下的载流子数目差值, E 表示激光器的慢变场振幅, κ 表示光场的衰减率, α 表

示线宽增强因子, γ_a 和 γ_p 分别表示有源介质线性色散效应和双折射效应, γ_s 表示自旋反转速率, η 表示总的载流子数的衰减率, f 表示光反馈强度, η 表示 D-VCSEL 注入到 R-VCSEL₁ 或 R-VCSEL₂ 的注入强度, μ 表示归一化的偏置电流, τ_1 表示反馈时间, τ_2 表示 D-VCSEL 注入到 R-VCSEL₁ 和 R-VCSEL₂ 的注入时间, ν 表示光的频率, $\Delta\nu^{D1,D2}$ 表示 D-VCSEL 与 R-VCSEL₁ 和 R-VCSEL₂ 的频率失谐, 其中 $\Delta\nu^{D1} = \nu^D - \nu^1$, $\Delta\nu^{D2} = \nu^D - \nu^2$. 自发辐射噪声 F 可表示为

$$\begin{aligned} F_x^{D,1,2} = & \sqrt{\beta_{sp}/2} \left(\sqrt{N^{D,1,2} + n^{D,1,2}} \xi_1^{D,1,2} \right. \\ & \left. + \sqrt{N^{D,1,2} - n^{D,1,2}} \xi_2^{D,1,2} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} F_y^{D,1,2} = & -i\sqrt{\beta_{sp}/2} \left(\sqrt{N^{D,1,2} + n^{D,1,2}} \xi_1^{D,1,2} \right. \\ & \left. - \sqrt{N^{D,1,2} - n^{D,1,2}} \xi_2^{D,1,2} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

其中 β_{sp} 是自发辐射噪声强度, ξ_1 和 ξ_2 表示平均值是 0、方差为 1 的高斯白噪声.

而信号的在光纤信道中的传输可以用非线性薛定谔方程来描述^[25], 即

$$i \frac{\partial E(z, T)}{\partial z} = -\frac{i}{2} \alpha_F E + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 E}{\partial T^2} - \gamma_F |E|^2 E, \quad (7)$$

其中, $E(z, T)$ 表示信号的慢变场振幅, z 表示传输距离, α_F 表示光纤损耗, β_2 表示二阶色散系数, T 表示信号脉冲群速度 V_g 运动的参照系中的时间变量, γ_F 表示光纤的非线性效应.

引入关联函数 C 来描述系统中 VCSELs 各对应线偏振模式之间的同步质量, 其定义为

$$C_{x,y}^{D1}(\Delta t) = \frac{\langle [I_{x,y}^D(t) - \langle I_{x,y}^D(t) \rangle] [I_{x,y}^1(t + \Delta t) - \langle I_{x,y}^1(t) \rangle] \rangle}{\langle |I_{x,y}^D(t) - \langle I_{x,y}^D(t) \rangle|^2 \rangle^{1/2} \langle |I_{x,y}^1(t + \Delta t) - \langle I_{x,y}^1(t) \rangle|^2 \rangle^{1/2}}, \quad (8)$$

$$C_{x,y}^{D2}(\Delta t) = \frac{\langle [I_{x,y}^D(t) - \langle I_{x,y}^D(t) \rangle] [I_{x,y}^2(t + \Delta t) - \langle I_{x,y}^2(t) \rangle] \rangle}{\langle |I_{x,y}^D(t) - \langle I_{x,y}^D(t) \rangle|^2 \rangle^{1/2} \langle |I_{x,y}^2(t + \Delta t) - \langle I_{x,y}^2(t) \rangle|^2 \rangle^{1/2}}, \quad (9)$$

$$C_{x,y}^{12}(\Delta t) = \frac{\langle [I_{x,y}^1(t) - \langle I_{x,y}^1(t) \rangle] [I_{x,y}^2(t + \Delta t) - \langle I_{x,y}^2(t) \rangle] \rangle}{\langle |I_{x,y}^1(t) - \langle I_{x,y}^1(t) \rangle|^2 \rangle^{1/2} \langle |I_{x,y}^2(t + \Delta t) - \langle I_{x,y}^2(t) \rangle|^2 \rangle^{1/2}}, \quad (10)$$

式中, $\langle \cdot \rangle$ 表示时间平均, $I = |E|^2$ 表示输出强度, Δt 表示计算关联函数的时移, C^{D1} 表示 D-VCSEL 和 R-VCSEL₁ 间的关联函数, C^{D2} 表示 D-VCSEL 与 R-VCSEL₂ 间的关联函数, C^{12} 表示 R-VCSEL₁ 和 R-VCSEL₂ 间的关联函数. $|C|$ 的取值范围为 [0, 1], $|C|$ 的值越大, 表示两个激光器相应模式间的同步性越好, $|C| = 1$ 表示达到完美同步.

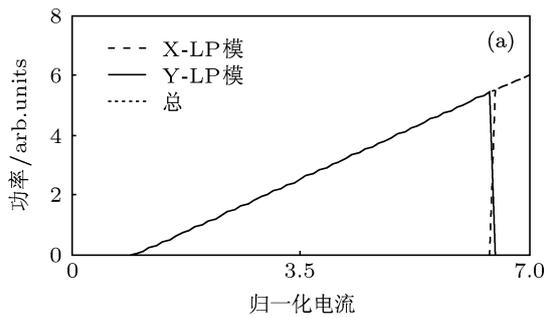
系统的通信质量则利用 Q 因子来进行评估. Q 因子的定义为 $Q = [\langle P_1 \rangle - \langle P_0 \rangle] / [\sigma_1 + \sigma_0]$, 其中 $\langle \cdot \rangle$ 表示对时间求平均, P_1 和 P_0 分别表示比特“1”和比特“0”的功率, σ_1 和 σ_0 分别表示比特“1”和比特“0”的功率标准差. Q 因子越高表示通信质量越好, 若 Q 值大于 6 则相应的误码率 $\text{BER} < 10^{-9}$ ^[26,27], 此时表明系统的通信效果良好.

3 结果与讨论

基于上述系统构架及理论模型, 可利用四阶龙格-库塔法对该系统的性能进行相关仿真研究. 为简便起见, 计算中除归一化偏置电流和光频率外, D-VCSEL, R-VCSEL₁ 和 R-VCSEL₂ 的其他参数假定都相同, 相关参数为 [28]: $\kappa = 125 \text{ ns}^{-1}$, $\alpha = 2.2$, $\gamma = 0.67 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_p = 192 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_s = 1000 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_a = 0.2 \text{ ns}^{-1}$, $\beta_{sp} = 10^{-5} \text{ ns}^{-1}$. $\nu^D = 1221 \text{ THz}$ (对应的激光器波长为 1543 nm), $\Delta\nu^{D1} = \Delta\nu^{D2} = -3 \text{ GHz}$.

3.1 $P-I$ 曲线

图 2(a) 给出了自由运行下 1550 nm-VCSEL 的 $P-I$ 曲线. 从 (a) 中可以看出: 在归一化偏置电流为 6.5 的时候, 产生了偏振开关. 在合适的外部扰动下, VCSELs 有可能存在 X-LP 模与 Y-LP 模共存的



现象. 图 2(b) 给出了偏振保持光反馈下 1550 nm-VCSEL 的 $P-I$ 曲线. 随着注入电流的增加, X-LP 模渐渐起振, 两个模式的功率随着电流的增加总体呈现上升的趋势, 但存在一定的波动 [26]. 在归一化电流 $\mu = 6.5$ 时, 两个模式的平均功率大致相等. 因此, 在接下来的讨论中, D-VCSEL 的外部参数设置为 $\mu^D = 6.5$, $\tau_1 = 4 \text{ ns}$, $f = 15 \text{ ns}^{-1}$, 此时两线偏振模式均呈现混沌输出.

3.2 短距离信息传输

假定 D-VCSEL 到 R-VCSEL₁ 和 R-VCSEL₂ 的注入时间 $\tau_2 = 4 \text{ ns}$, 此时传输信道对信息影响可以忽略. 图 3 给出了驱动激光器 D-VCSEL 在 $\mu^D = 6.5$, $\tau_1 = 4 \text{ ns}$, $f = 15 \text{ ns}^{-1}$ 时输出的 X-LP 模和 Y-LP 模的时间序列, 以及两响应激光器 R-VCSEL₁ 和 R-VCSEL₂ 在 $\mu^1 = \mu^2 = 6.4$, $\eta_1 = \eta_2 = 19 \text{ ns}^{-1}$

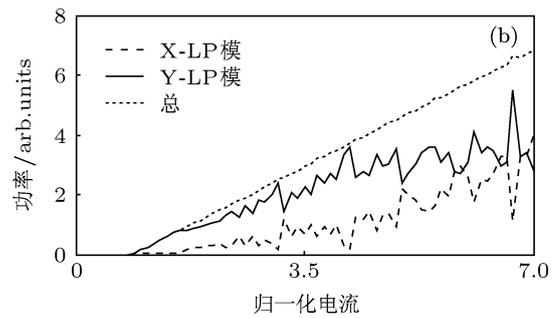


图 2 (a) 自由运行 1550 nm-VCSEL 的 $P-I$ 曲线; (b) 反馈时间 $\tau_1 = 4 \text{ ns}$, 反馈强度 $f = 15 \text{ ns}^{-1}$ 时偏振保持光反馈下 1550 nm-VCSEL 的 $P-I$ 曲线

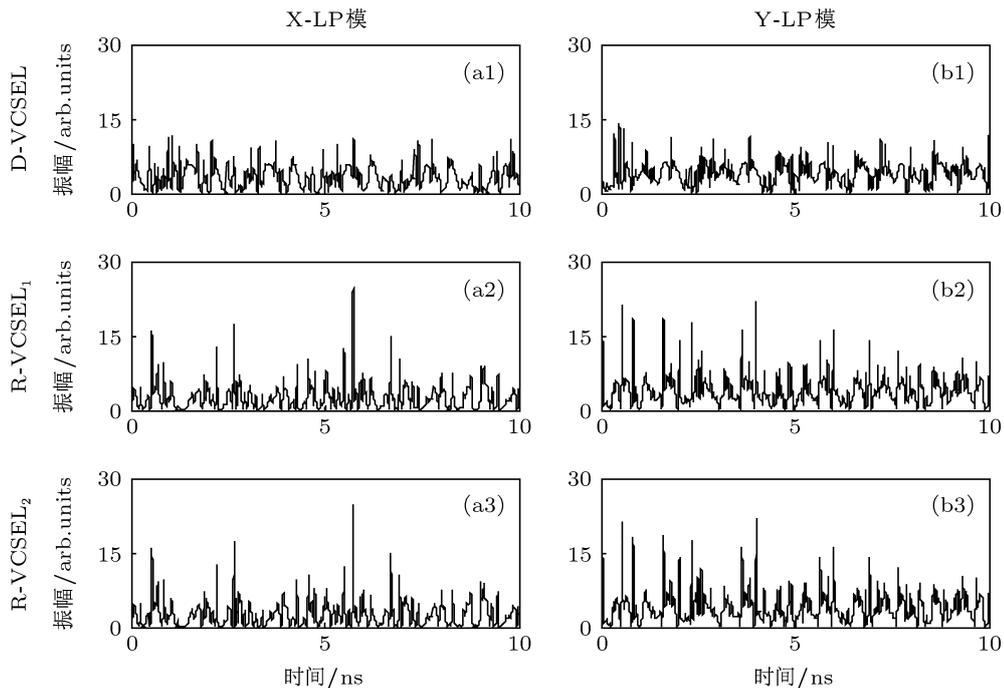


图 3 D-VCSEL, R-VCSEL₁, R-VCSEL₂ 的 X-LP 模 (a1)—(a3) 以及 Y-LP 模 (b1)—(b3) 输出的混沌时间序列

时输出的 X-LP 模和 Y-LP 模的时间序列. 此时, 三个 VCSELs 输出的各偏振模式均呈现混沌态, D-VCSEL 与 R-VCSEL₁ (R-VCSEL₂) 的混沌时间序列存在较大差异, 而 R-VCSEL₁ 和 R-VCSEL₂ 的混沌时间序列则基本一致. 通过数值计算得出 D-VCSEL 与 R-VCSEL₁ (R-VCSEL₂) 各相应线偏振模式之间的关联系数仅为 0.56 (0.48). 而 R-VCSEL₁ 和 R-VCSEL₂ 之间各对应线偏振模式的极大相关系数出现在 $\Delta t = 0$, 大小近似为 1.0, 说明各对应线偏振模式之间能达到等时的高质量混沌同步. R-VCSEL₁ 和 R-VCSEL₂ 之间高质量的混沌同步为它们之间实现双向双信道混沌保密通信提供了可能.

图 4 给出了基于 R-VCSEL₁ 和 R-VCSEL₂ 之间高质量混沌同步实现双向双信道混沌通信效果. (a1)—(d1) 为四个原始信息 m_1 — m_4 , 其速率均为 2.5 Gbit/s. 这些消息均通过混沌调制加载到相应的混沌载波中 (如图 1 所示), 调制深度为 0.05. 图 4(a2)—(d2) 中给出了信息加载到混沌载波后的混沌信号时间序列, 此时信息在混沌载波中得到了很好的隐藏. 接收端解调出的信息 m'_1 — m'_4 如 (a3)—

(d3) 所示, 解调信息与加载信息基本一致, 说明信息得到了有效解调. (a4)—(d4) 给出了相应的眼图, 眼图清晰可见. 因此, 该系统可以有效实现信息的短距离双向双信道混沌保密传输.

3.3 长距离信息传输

要实现信息的长距离传输, 需要借助于长距离光纤传输信道. 考虑到需要利用两个线偏振模式分别作为混沌载波对信息进行隐藏, 因此光纤信道采用单模保偏光纤. 当信号在单模保偏光纤中传输时, 光纤中的损耗、群速度色散以及非线性效应会使信号在传输过程中发生形变, 从而影响信号的解调质量 [5,29]. 由于信号在光纤中的长距离传输所遭受到的损耗可通过引入分布光放大器进行有效的补偿, 因此在以下的结果中, 将不考虑光纤损耗的影响. 图 5 给出了加载于 R-VCSEL₁ 和 R-VCSEL₂ 的 X-LP 模与 Y-LP 模的信息经普通单模保偏光纤传输不同距离后的解调效果. 单模保偏光纤参数为 $\beta_2 = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\gamma = 0.0015 \text{ W}^{-1}\text{m}^{-1}$. 从图中可看出, 随着传输距离增加, 解调信息的眼图效果逐渐变差.

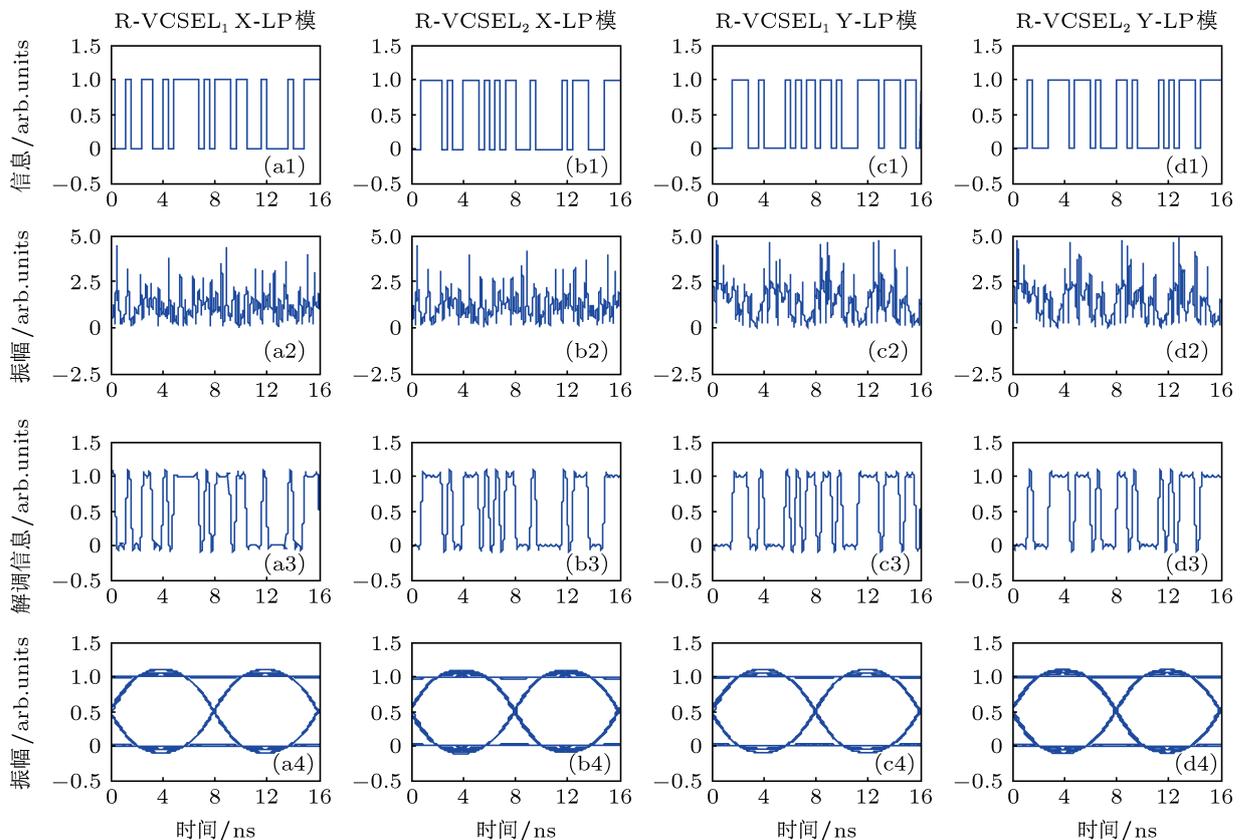


图 4 信息的双向双信道加载与解调. (a1)—(d1) 为加载的伪随机比特序列信息 m_1 — m_4 ; (a2)—(d2) 为加载信息后的混沌信号; (a3)—(d3) 为解调信息; (a4)—(d4) 为解调信息的眼图

图 6 给出了加载到两个 VCSELs 的两个线偏振模式上的信息经过不同传输距离后解调出来信息的 Q 因子随传输距离的变化曲线. 当传输距离增加时, 解调信息的 Q 因子呈现下降的趋势, 经 60 km 的传输后, 双向双信道解调出的信息的 Q 值在 6 以上, 说明系统可以实现 60 km 的双向双信道的混沌保密通信. 如果采用采用色散位移保偏光纤作为传输信道, 则可得到更好的通信性能. 图

7 给出了采用色散位移保偏光纤后得到的相应结果. 色散位移保偏光纤的参数为 $\beta_2 = -0.1 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\gamma = 0.0015 \text{ W}^{-1}\text{m}^{-1}$. 与单模保偏光纤时的结果 (如图 6 所示) 相比, 采用色散位移保偏光纤可使解调信息的 Q 因子显著增加, 解调效果更好. 对 100 km 的传输距离, 解调信息的 Q 因子仍然可以保持在 10 以上. 进一步的计算还表明: 传输距离长达 200 km 时, 解调信息的 Q 值仍保持在 6 以上.

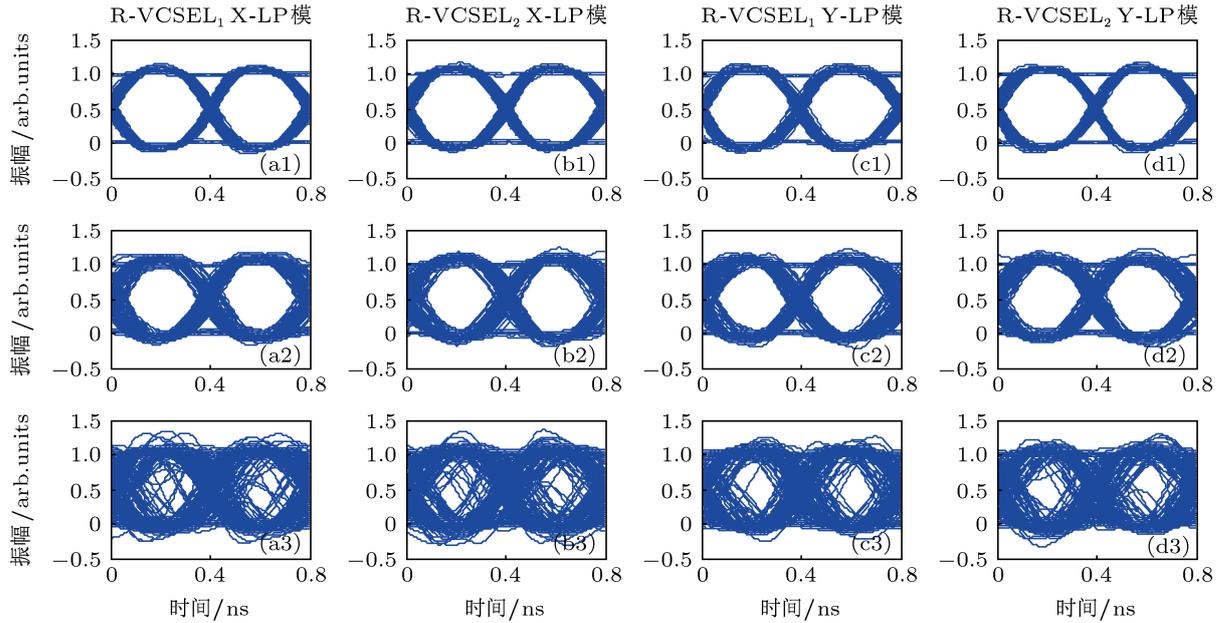


图 5 2.5 Gbit/s 信号经过不同长度的单模保偏光纤混沌保密传输后解调得到的信息眼图 (a1)—(d1): 20 km; (a2)—(d2): 60 km; (a3)—(d3): 100 km

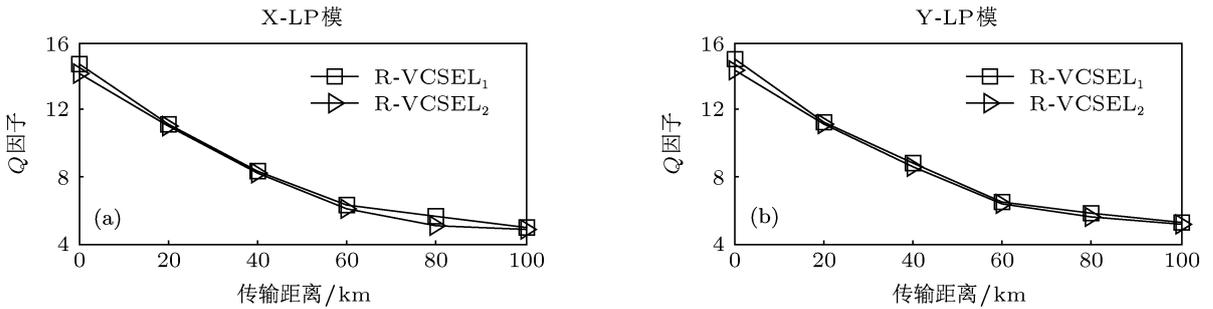


图 6 2.5 Gbit/s 信号经过单模保偏光纤传输不同距离后解调信息的 Q 因子随传输距离的变化曲线 (a) X-LP 模; (b) Y-LP 模

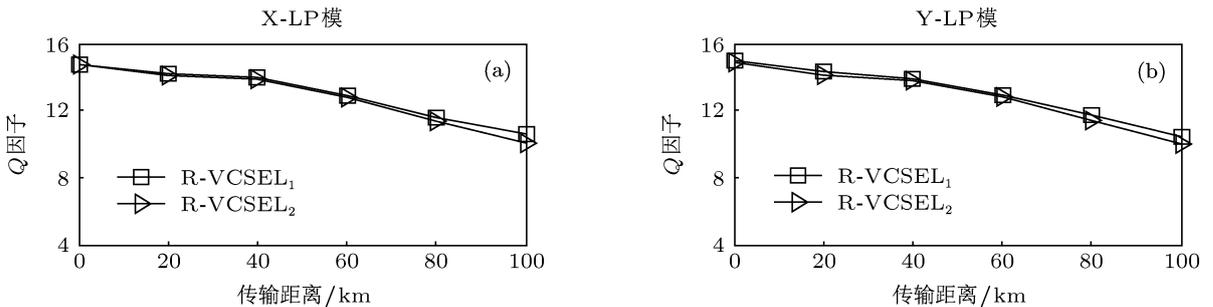


图 7 2.5 Gbit/s 信号经过色散位移保偏光纤传输不同距离后解调信息的 Q 因子随传输距离的变化曲线 (a) X-LP 模; (b) Y-LP 模

最后,简单分析该系统的安全性.由于 D-VCSEL 与 R-VCSEL₁ (或 R-VCSEL₂) 中各对应线偏振模式之间的关联系数最大值分别为 0.56 和 0.48,即 D-VCSEL 与 R-VCSEL₁ (或 R-VCSEL₂) 的同步效果较差.因此,窃密者不能通过截取 F₁ (或 F₂) 和 F₃ 光纤链路中传输的混沌信号而解调出信息.同时,窃密者也无法通过对 F₃ 光纤链路中双向传输的信号做“减”操作来窃取信息,因为此时所截取的信息是两个反向传输信息的差值,并不能完全恢复传输的信号本身,从而有效的保障了系统的安全性.

另外,需要指出的是,以上结果均是在假定光纤链路 F₁ 与光纤链路 F₂ 保持对称且 R-VCSEL₁ 和 R-VCSEL₂ 具有相同的内部参数条件下得到的.如果光纤链路 F₁ 与光纤链路 F₂ 不对称、以及 R-VCSEL₁ 和 R-VCSEL₂ 之间存在参数失配,基于我们以前的相关研究结果^[30],系统的同步性能和通信性能都将会下降.因此,在实际的系统中,需要选择性能参数相同的光纤及器件构建光纤链路 F₁ 与

光纤链路 F₂,同时尽可能选择两只参数失配小的 VCSLEs 分别用作 R-VCSEL₁ 和 R-VCSEL₂.

4 结论

本文提出了一种新型的可实现双向双信道长距离混沌保密通信的系统,研究了系统的同步性能、双向双信道混沌通信性能以及光纤信道对信息传输的影响.结果表明:在驱动激光器产生的同一混沌光的注入下,两响应激光器各线偏振模式之间能实现了良好的等时混沌同步,同时驱动激光器和响应激光器各线偏振模式之间的同步系数较低.基于两响应 VCSELs 之间各线偏振模式的优质同步性能,可实现双向双信道混沌通信.当采用单模保偏光纤作为通信信道时,2.5 Gbit/s 信息传输 60 km 后解调信息的 Q 因子仍可保持在 6 以上;若采用色散位移保偏光纤作为通信信道,信息传输 100 km 后解调信息的 Q 因子可保持在 10 以上.

- [1] Pecora L M, Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [2] Roy R, Thornburg K S 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 2009
- [3] Mirasso R C, Colet P, Garcia-Fernandez P 1996 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8** 299
- [4] Wang Y C, Li Y L, Wang A B, Wang B J, Zhang G W, Guo P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4686 (in Chinese) [王云才,李艳丽,王安邦,张耕玮,郭萍 2007 物理学报 **56** 4686]
- [5] Yan S L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2819 (in Chinese) [颜森林 2008 物理学报 **61** 2819]
- [6] Argyris A, Syvridis D, Larger L, Annovazzi-Lodi V, Colet P, Fischer I, Garcia-Ojalvo J, Mirasso C R, Pesquera L, Shore K A 2005 *Nature* **438** 343
- [7] Zhang J Z, Wang A B, Wang J F, Wang Y C 2009 *Opt. Express* **17** 6357
- [8] Zhang J Z, Wang A B, Wang Y C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3793 (in Chinese) [张建忠,王安邦,王云才 2009 物理学报 **58** 3793]
- [9] Liu H J, Feng J C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1484 (in Chinese) [刘慧杰,冯久超 2009 物理学报 **58** 1484]
- [10] Liu J, Wu Z M, Xia G Q 2009 *Opt. Express* **17** 12619
- [11] Zhao Q, Yin H, Chen X, 2012 *Appl. Opt.* **51** 5585
- [12] Hu H P, Yu Z L, Liu L F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 190504 (in Chinese) [胡汉平,于志良,刘凌峰 2012 物理学报 **61** 190504]
- [13] Klein E, Gross N, Kopelowitz E, Rosenbluh M, Khaykovich L, Kinzel W, Kanter I 2006 *Phys. Rev. E* **74** 046201
- [14] Zhang W L, Pan W, Luo B, Zou X H, Wang M Y, Zhou Z 2008 *Opt. Lett.* **33** 237
- [15] Deng T, Xia G Q, Cao L P, Chen J G, Lin X D, Wu Z M 2009 *Opt. Commun.* **282** 2243
- [16] Deng T, Xia G Q, Wu Z M, Lin X D, Wu J G 2011 *Opt. Express.* **19** 8762
- [17] Yamamoto T, Oowada I, Yip H, Uchida A, Yoshimori S, Yoshimura K, Muramatsu J, Goto S, Davis P 2007 *Opt. Express* **15** 3974
- [18] Annovazzi-Lodi V, Aromataris G, Benedetti M, Hamacher M, Merlo S, Vercesi V 2010 *IEEE J. Quantum Electron.* **42** 143
- [19] Wu J G, Wu Z M, Xia G Q, Deng T, Lin X D, Tang X, Feng G Y 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 1854
- [20] Wu J G, Wu Z M, Tang X, Fan L, Deng W, Xia G Q 2013 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **25** 587
- [21] Li P, Wu J G, Wu Z M, Lin X D, Deng D, Liu Y R, Xia G Q 2011 *Opt. Express* **19** 2392
- [22] Xiao Y, Deng T, Wu Z M, Wu J G, Lin X D, Tang X, Zeng L B, Xia G Q 2012 *Opt. Commun.* **285** 1442
- [23] Jiang N, Pan W, Luo B, Xiang S Y, Yang L, 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1094
- [24] Martin-Regalado J, Prati F, San Miguel M, Abraham N B 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 765
- [25] Agrawal G P 2001 *Nonlinear Fiber Optics* (3rd Edn) (California: Academic Press) p49
- [26] Bergano N S, Kerfoot F W, Davidson C R 1993 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5** 304
- [27] Bogris A, Kanakidis D, Argyris A, Syvridis D 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 1326
- [28] Zheng A J, Wu Z M, Deng T, Li X J, Xia G Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234203 (in Chinese) [郑安杰,吴正茂,邓涛,李小坚,夏光琼 2012 物理学报 **61** 234203]
- [29] Nguimdo R M, Lavrov R, Colet P, Jacquot M, Chembo Y K, Larger L 2010 *J. Lightw. Technol.* **28** 2688
- [30] Wu J G, Wu Z M, Liu Y R, Fan L, Tang X, Xia G Q 2013 *J. Lightw. Technol.* **31** 461

Investigation of bidirectional dual-channel long-distance chaos secure communication based on 1550nm vertical-cavity surface-emitting lasers*

Zhao Yan-Mei Xia Guang-Qiong Wu Jia-Gui Wu Zheng-Mao[†]

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

(Received 4 June 2013; revised manuscript received 24 June 2013)

Abstract

Based on the chaos synchronization between two pairs of corresponding linear polarization modes in two 1550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers (1550 nm-VCSELs) subject to optical injection of common chaotic signals, a novel bidirectional and dual-channel long-distance chaos secure communication system is proposed. The chaotic synchronization characteristics, bidirectional dual-channel communication performance, and the influences of the fiber channel on the message transmission are numerically investigated. Results show that, driven by a common chaotic signal generated from a driver VCSEL (D-VCSEL), two pairs of responding linear polarization modes in two response 1550nm-VCSELs (R-VCSELs) can be synchronized completely and isochronally. Meanwhile, the synchronization coefficients between the two pairs of responding linear polarization modes in D-VCSEL and R-VCSELs are low. Based on the high quality chaos synchronization between two pairs of responding linear modes in two R-VCSELs, bidirectional and dual-channel chaos secure communication can be achieved. After adopting a single mode polarization-maintaining fiber (or dispersion-shifted polarization-maintaining fiber), for 2.5 Gbit/s messages, the Q factor of the decryption signals after transmitting 60 km (or 200 km) can be more than 6.

Keywords: vertical-cavity surface emitting lasers (VCSELs), bidirectional dual-channel, chaos communication, optical fiber

PACS: 42.55.Px, 05.45.Vx

DOI: 10.7498/aps.62.214206

* 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