

基于半导体环形激光器的高速双向双信道混沌保密通信*

王顺天 吴正茂 吴加贵 周立 夏光琼†

(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2015年2月5日收到; 2015年3月10日收到修改稿)

提出了一种利用半导体环形激光器 (SRLs) 的新型高速双向、双信道混沌保密通信系统. 在该系统中, 首先利用交叉双光反馈对驱动激光器的顺时针模式和逆时针模式的混沌延时特征进行抑制. 然后将此混沌信号注入到一对响应激光器对应的顺时针模式和逆时针模式中, 以实现带宽的增强及混沌同步. 最后基于响应激光器之间的混沌同步, 实现高速率、双向、双信道的混沌保密通信. 通过对驱动激光器在交叉双光反馈作用下的混沌特性、以及响应激光器在不同条件下的同步特性进行了相关理论和仿真研究, 结果表明: 驱动激光器在合适的交叉双光反馈作用下可以产生延时特性被良好隐藏的顺时针模式和逆时针模式混沌信号; 在该混沌信号的注入下, 响应激光器输出的混沌信号带宽可以得到明显增强; 通过设置合适注入强度值和频率失谐值, 响应激光器之间可实现高质量的等时混沌同步. 最后, 对系统的双向、双信道混沌保密通信特性进行了讨论. 当 10 Gbit/s 信号传输距离为 10 km 时, 解调信息 Q 因子值仍可保持在 6 以上.

关键词: 半导体环形激光器, 混沌保密通信, 双信道, 双向

PACS: 42.55.Px, 05.45.-a, 05.45.Gg, 05.45.Vx

DOI: 10.7498/aps.64.154205

1 引言

自 Pecora 和 Carroll 在 1990 年提出并验证了混沌同步 [1] 以来, 混沌在信息保密通信领域的应用就受到持续关注 [2-5]. 基于半导体激光器 (semiconductor lasers, SLs) 所产生的混沌载波信号, Argyris 等在 2005 年实现了 120 km 商用光纤网络中 1 Gbit/s 信息的单向混沌保密通信 [6]. 近年来, 一些双向混沌保密通信的方案相继被提出 [7-13]. 如基于两个互耦合的 SLs 之间的混沌同步实现双向信息保密通信 [7-9]; 以及利用一个 SLs 的混沌光注入到另外两个响应激光器中 [10-13], 使两个响应激光器之间达到混沌同步并进而实现双向信息保密通信. 就目前而言, 光混沌保密通信方案还主要是

基于边发射半导体激光器 (EELs) 和垂直腔面发射激光器 (VCSELs), 而基于新型的半导体环形激光器 (semiconductor ring lasers, SRLs) 的混沌保密通信的研究还相对比较缺乏.

SRLs 具有环形谐振腔, 腔内激光并不需要端面或者反射镜来提供反馈, 因而相比其他类型 SLs 而言, 具有高集成度、小尺寸、低阈值、低功耗等独特优势 [14-25]. 特别是 SRLs 可存在两个沿相反方向传输的模式 [14], 即顺时针 (clockwise, CW) 模式和逆时针 (counterclockwise, CCW) 模式, 为双信道并行通信提供了可能. 研究表明, SRLs 在合适的外部扰动作用下, 可以产生光学双稳态和多稳态 [15,16]、四波混频 [17]、方波振荡 [18] 以及混沌等 [19] 丰富的非线性动力学态, 在信息的保密传输 [20-22]、高速随机数获取 [23]、毫米波信号产生 [24,25] 等领

* 国家自然科学基金 (批准号: 61178011, 61275116, 61475127, 11474233)、重庆市高等学校青年骨干教师资助计划 (批准号: 102060-20600512) 和西南大学中央高校基本科研业务费专项基金 (批准号: XDJK2013B037, XDJK2014C079, SWU114004) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gqxia@swu.edu.cn

域具有诱人的应用前景. 目前报道的基于SRLs的混沌保密通信方案主要关注于单向的信息传输^[20-22], 且由于受到SRLs的响应带宽的限制, 传输信息的速率相对较低.

最近, Li等提出并证实了SRLs在由一个外部光反馈SL产生的混沌光的注入下可输出带宽增强的混沌信号^[26]. 在本文中, 我们利用交叉双光反馈作用下的一个驱动半导体环激光器 (driving SRL, D-SRL) 所产生的混沌信号注入到两个响应半导体环激光器 (responding SRL, R-SRLs), 构建了一个完全基于SRLs的带宽增强混沌保密通信系统. 首先, 我们利用D-SRL在合适的交叉双光反馈作用下, 产生两个低延时特征的CW模式和CCW模式混沌光信号; 然后, 将其分别注入到

R-SRLs对应的CW模式和CCW模式中并通过选择合适的注入参数, 使两个R-SRLs输出带宽明显增强的CW模式和CCW模式混沌信号, 同时这两个R-SRLs中的同向模式之间也能实现良好的混沌同步. 在此基础上, 提出了双向、双信道的混沌通信系统方案, 并对10 Gbit/s信息在该系统中的保密传输性能进行了分析.

2 系统结构

基于SRLs的高速双向、双信道混沌通信系统的结构示意图如图1所示. 驱动半导体环激光器 (D-SRL) 中的CW模式输出光的其中一部分经过光纤耦合器 (FC) 后分别经过两段不同长度的支路

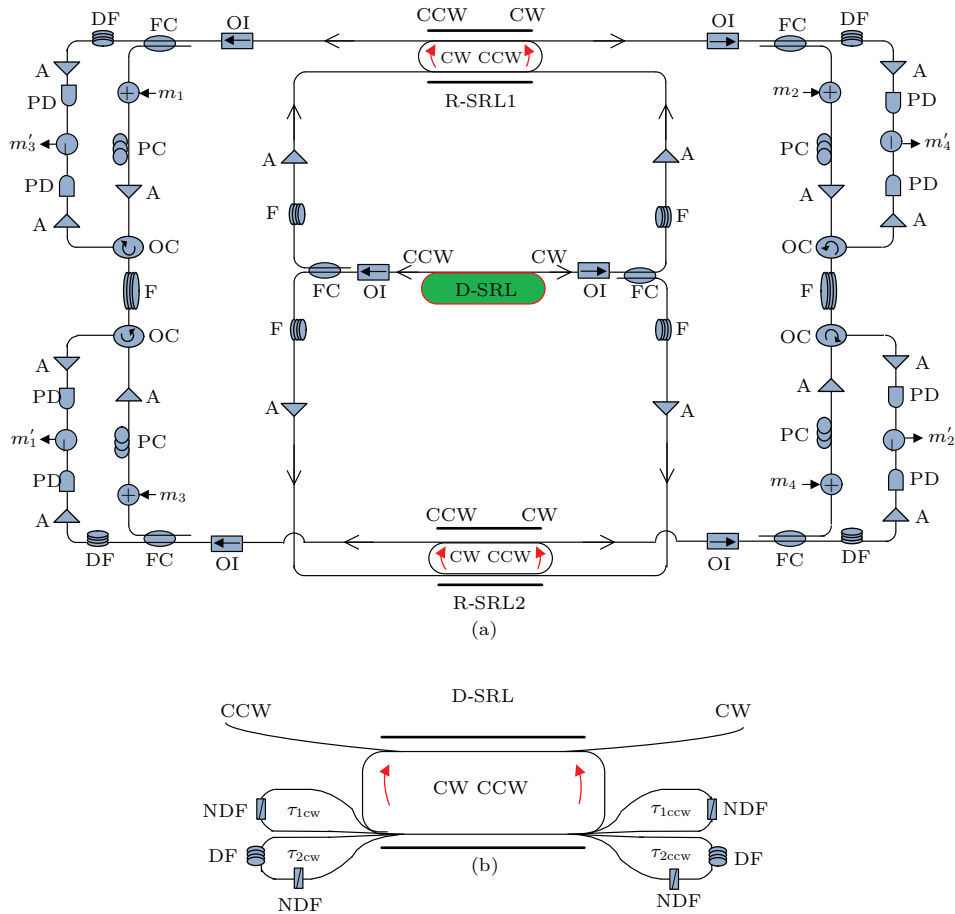


图1 (网刊彩色) (a) 基于SRLs的高速双向、双信道混沌通信系统的结构示意图; (b) D-SRL 的结构示意图 (SRLs: 半导体环激光器; D-SRL: 驱动激光器; R-SRL: 响应激光器; NDF: 中性密度衰减器; OI: 光隔离器; A: 光放大器; FC: 光纤耦合器; F: 光纤; PC: 偏振控制器; OC: 光环行器; DF: 延时光纤; PD: 光电探测器; m: 调制信号; m': 解调信号; →: 光传输方向)

Fig. 1. (color online) (a) Schematic diagram of high-speed bidirectional dual-channel chaos secure communication system based on semiconductor ring lasers; (b) Structure diagram of D-SRL. SRLs, semiconductor ring lasers; D-SRL, driving semiconductor ring laser; R-SRL, responding semiconductor ring laser; NDF, neutral density filter; OI, optical isolator; A, amplifier; FC, fiber coupler; F, fiber; PC, polarization controller; OC, optical circulator; DF, delay fiber; PD, photodetector; m, encoded message; m', decoded message; →, optical transmission direction.

后再经过光纤耦合器(FC)汇合后反馈回到CCW模式中. 而D-SRL的CCW模式光也经过相似过程反馈到CW模式中. 这样就构成了交叉双光反馈结构. 接下来, D-SRL中CW模式输出光的一部分经过一个FC分成两路, 分别经过放大器(A)和光纤(F)注入到两个响应SRLs(R-SRL1和R-SRL2)的对应CW模式中, 得到一对带宽增强且同步的混沌信号. 而D-SRL的CCW模式输出光经历一个相似的过程, 注入到两个R-SRLs的CCW模式中, 得到另一对带宽增强且同步的混沌信号. 系统中反馈强度由中性密度衰减器(NDF)控制, 注入强度可通过调节放大器A的增益来控制, 而两个反馈支路的延时值可通过延迟光纤(DF)进行控制. 系统中光隔离器(OI)用于保证光的单向传输. 信息的加载方式可以采用文献[13]中所提出的混沌掩藏方式. 不同的是, 这里的R-SRLs同时具有两个模式(CW和CCW模式), 因而可以实现双通道的双向混沌通信.

3 理论模型

系统中描述各激光器动力学特性的速率方程[21,23]

$$\begin{aligned} \dot{E}_{cw,ccw}^D &= \kappa(1+i\alpha)[g_{cw,ccw}^D N^D - 1]E_{cw,ccw}^D \\ &+ \eta_{1ccw,cw} E_{ccw,cw}^D(t - \tau_{1ccw,cw}) e^{-i2\pi f_0 \tau_{1ccw,cw}} \\ &+ \eta_{2ccw,cw} E_{ccw,cw}^D(t - \tau_{2ccw,cw}) e^{-i2\pi f_0 \tau_{2ccw,cw}} \\ &- (k_d + ik_c)E_{ccw,cw}^D + \sqrt{D^D} \xi_{cw,ccw}^D, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{cw,ccw}^{1,2} &= \kappa(1+i\alpha)[g_{cw,ccw}^{1,2} N^{1,2} - 1]E_{cw,ccw}^{1,2} \\ &+ k_{cw,ccw} E_{cw,ccw}^D(t - \tau_c) e^{-i2\pi f_0 \tau_c + i2\pi \Delta f_{1,2} t} \\ &- (k_d + ik_c)E_{ccw,cw}^{1,2} + \sqrt{D^{1,2}} \xi_{cw,ccw}^{1,2}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{N}^{D,1,2} &= \gamma[\mu - N^{D,1,2} - g_{cw}^{D,1,2} N^{D,1,2} |E_{cw}^{D,1,2}|^2 \\ &- g_{ccw}^{D,1,2} N^{D,1,2} |E_{ccw}^{D,1,2}|^2], \end{aligned} \quad (3)$$

方程中下标cw和ccw分别表示SRLs中的CW和CCW两个模式, 上标D, 1和2分别表示D-SRL, R-SRL1和R-SRL2. E 为激光器的慢变场振幅, N 为载流子数, κ 为光场衰减率, α 为线宽增强因子. k_d 和 k_c 分别表示耗散和保守耦合系数, γ 为载流子衰减率. μ 为归一化注入电流, 当激光器工作在阈值时 $\mu = 1$ [20]. η_1 和 η_2 为两个

支路的反馈强度, 而 τ_1 和 τ_2 分别为两个支路的反馈延迟时间. k 为注入强度, τ_c 为注入延时时间. f_0 为D-SRL的激射频率, 而 Δf_1 和 Δf_2 分别代表了D-SRL与R-SRL1, R-SRL2的频率失谐. 微分增益 $g_{cw} = 1 - s|E_{cw}|^2 - c|E_{ccw}|^2$, $g_{ccw} = 1 - s|E_{ccw}|^2 - c|E_{cw}|^2$, 其中 s 和 c 表征自饱和系数和交叉饱和系数. 方程(1)和(2)最后一项表示自发辐射噪声项, ξ 为平均值为0, 方差为1的高斯白噪声, D 表征噪声强度[21,27]

$$D = D_m(N + G_0 N_0 / \kappa), \quad (4)$$

这里的 D_m 为自发辐射因子, G_0 为增益系数, N_0 为透明的载流子密度. 需要指出的是: 方程(2)仅适合于D-SRL输出的信号经过自由空间传输后注入在R-SRLs的情形. 对于D-SRL输出的信号经过光纤信道注入到R-SRLs的情形, 式中的 $E_{cw,ccw}^D(t - \tau_c)$ 需要替代为 $E_{cw,ccw}^D(t)$ 经过光纤传输 τ_c 后所得到的复振幅.

信号在光纤信道中传输的非线性薛定谔方程[28]

$$i \frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{i}{2} \alpha_F E + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 E}{\partial T^2} - \gamma_F |E|^2 E, \quad (5)$$

式中, E 为信号的慢变场振幅, α_F 为光纤损耗, β_2 为光纤的二阶色散系数, γ_F 为光纤的非线性系数, z 为传输距离.

这里引入关联函数 C 来描述系统中SRLs的各模式之间的同步质量, 其定义为

$$\begin{aligned} C_{cw,ccw}^{i,j} &= \left\langle [I_{cw,ccw}^i(t - \Delta t) - \langle I_{cw,ccw}^i(t - \Delta t) \rangle] \right. \\ &\times [I_{cw,ccw}^j(t) - \langle I_{cw,ccw}^j(t) \rangle] \left. \right\rangle \\ &\times \left(\left\langle [I_{cw,ccw}^i(t - \Delta t) - \langle I_{cw,ccw}^i(t - \Delta t) \rangle]^2 \right\rangle \right. \\ &\left. \left\langle [I_{cw,ccw}^j(t) - \langle I_{cw,ccw}^j(t) \rangle]^2 \right\rangle \right)^{-1/2}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中上标 $i, j = D, 1, 2$ (D, 1和2分别表示D-SRL, R-SRL1和R-SRL2), 下标cw和ccw表示SRLs的两个模式, $I = |E|^2$ 为输出强度, Δt 为时移, $\langle \cdot \rangle$ 为时间平均值. 这里的 $\Delta t \in (-10 \text{ ns}, 10 \text{ ns})$, 步长为2 ps. $|C|$ 的取值范围为[0, 1]. 两个模式间的同步性能越好 $|C|$ 值就越大, 当 $|C| = 1$ 时, 达到完全同步. 进一步的, 系统通信质量可用 Q 因子来评估:

$$Q = [\langle P_1 \rangle - \langle P_0 \rangle] / (\sigma_1 + \sigma_0), \quad (7)$$

式中 $\langle \cdot \rangle$ 表示时间平均值, 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. 通信质量越好对应 Q 因子值越大.

4 结果与讨论

基于上述系统构架及理论模型, 我们对该系统的各种特性进行了数值仿真分析. 为了简便起见, 三个SRLs除了频率以外, 其余参数都假设相同. 具体参数值如下^[21,29]: $\alpha = 5$, $\mu = 2.5$, $s = 0.005$, $c = 2s$, $\kappa = 100 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma = 0.2 \text{ ns}^{-1}$, $k_d = 0.033 \text{ ns}^{-1}$, $k_c = 0.44 \text{ ns}^{-1}$, $G_0 = 10^{-12} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$,

$N_0 = 1.4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, $f_0 = 3.5294 \times 10^{14} \text{ Hz}$ (对应波长为850 nm). 由于该系统仿真所涉及的参数比较多, 基于简化计算、理清关键参数影响的考虑, 在下面模拟过程中我们忽略了自发辐射噪声的影响, 即 $D_m = 0$.

4.1 D-SRL的外腔反馈延时特性

图2给出了交叉双光反馈((a1), (a2), (b1), (b2))、以及单光反馈((a3), (a4), (b3), (b4))条件下, D-SRL输出的CW模式和CCW模式的功率谱

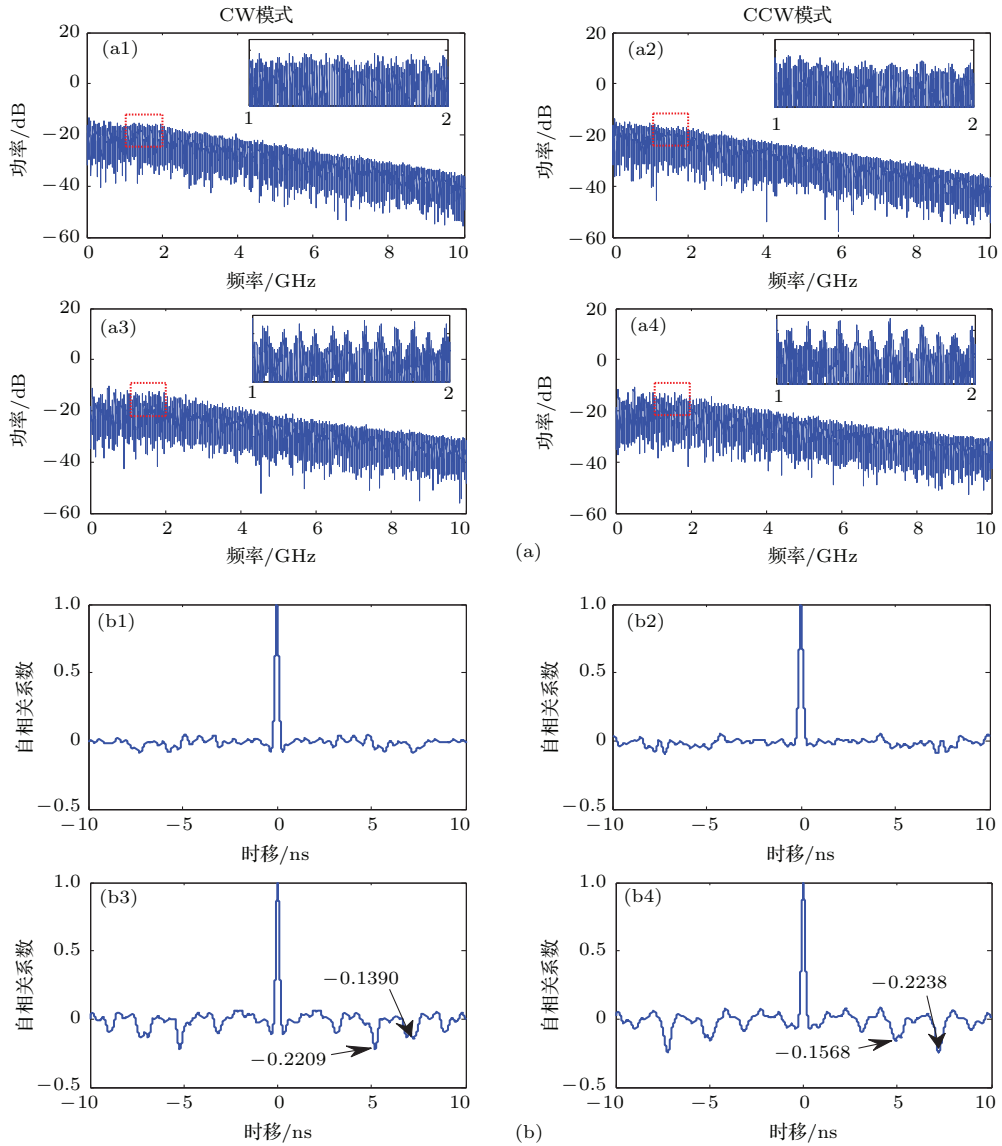


图2 (网刊彩色) $\eta_{1cw} = \eta_{2cw} = 5 \text{ ns}^{-1}$, $\eta_{1ccw} = \eta_{2ccw} = 7 \text{ ns}^{-1}$ 时交叉双光反馈((a1), (a2), (b1), (b2))、单光交叉反馈((a3), (a4), (b3), (b4)) D-SRL输出的功率谱(a)和自相关函数曲线(b). (双光反馈: $\tau_{1cw} = 5 \text{ ns}$, $\tau_{1ccw} = 7 \text{ ns}$, $\tau_{2cw} = 5.484 \text{ ns}$, $\tau_{2ccw} = 7.491 \text{ ns}$; 单光反馈: $\tau_{1cw} = \tau_{2cw} = 5 \text{ ns}$, $\tau_{1ccw} = \tau_{2ccw} = 7 \text{ ns}$)

Fig. 2. (color online) Power spectra (a) and self-correlation (b) of D-SRL under double optical cross-feedback ((a1), (a2), (b1), (b2)) and single optical cross-feedback ((a3), (a4), (b3), (b4)) for $\eta_{1cw} = \eta_{2cw} = 5 \text{ ns}^{-1}$, $\eta_{1ccw} = \eta_{2ccw} = 7 \text{ ns}^{-1}$. (double optical cross-feedback: $\tau_{1cw} = 5 \text{ ns}$, $\tau_{1ccw} = 7 \text{ ns}$, $\tau_{2cw} = 5.484 \text{ ns}$, $\tau_{2ccw} = 7.491 \text{ ns}$; single optical cross-feedback: $\tau_{1cw} = \tau_{2cw} = 5 \text{ ns}$, $\tau_{1ccw} = \tau_{2ccw} = 7 \text{ ns}$).

(a)、自相关函数曲线(b). 从图 2(a1), (a2), (b1), (b2) 可以看出, 此时 CW 和 CCW 模式输出的混沌信号功率谱比较平滑, 自相关函数曲线上在反馈的延时时间位置处无明显的峰值, 由此可以判定, 输出混沌信号的外腔延时特征得到较好的抑制. 需要指出的是: 图 2(a3), (a4), (b3), (b4) 所给出的是交叉双光反馈 D-SRL 输出的 CW 和 CCW 模式的延时特征都得到很好抑制时的结果. 此时, 反馈参数 $(\tau_{1cw}, \eta_{1cw})=(5 \text{ ns}, 5 \text{ ns}^{-1})$, $(\tau_{2cw}, \eta_{2cw})=(5.484 \text{ ns}, 5 \text{ ns}^{-1})$, $(\tau_{1ccw}, \eta_{1ccw})=(7 \text{ ns}, 6 \text{ ns}^{-1})$, $(\tau_{2ccw}, \eta_{2ccw})=(7.491 \text{ ns}, 6 \text{ ns}^{-1})$. 由于自由运行 D-SRL 的弛豫振荡周期为 $\tau_{RO} = 2\pi/\sqrt{2(\mu-1)\kappa\gamma}$ [29], 基于前面所给参数值, 对应 τ_{RO} 约为 0.81 ns, 即两支路之间的延时时间差约为 $\tau_{RO}/2$, 而此时 D-SRL 的延时特征得到了有效抑制. 这与在双外腔边发射激光器中延时特征抑制所满足的条件基本一致 [30]. 为了进行比较, 图 2 中的后两列给出了交叉单光反馈时 D-SRL 输出的 CW 模式和 CCW 模式的功率谱以及自相关函数曲线. 在模拟过程中, 只需令两个支路的延迟时间量相等, 即可由交叉双光反馈过渡到反馈参数为 $(\tau_{cw}, \eta_{cw})=(5 \text{ ns}, 10 \text{ ns}^{-1})$, $(\tau_{ccw}, \eta_{ccw})=(7 \text{ ns}, 12 \text{ ns}^{-1})$ 的交叉单光反馈. 从图 (b3, b4) 可以看出, 对于交叉单外腔反馈, 自相关曲线在时移为 5 ns (对应 CW 模式的反馈延迟时间)、以及 7 ns (对应 CCW 模式的反馈延迟时间) 处可观察到延时特征峰. 由于在本文中, 单交叉单光反馈的 CW 和 CCW 的反馈强

度均比文献 [29] 中所用的反馈强度增加了一倍, 因此所得延时特征峰比文献 [29] 中相应的结果更明显. 但采用交叉双光反馈后 (如前两列所示), 在所给的参数条件下 D-SRL 输出的 CW 模和 CCW 模混沌信号的延时特征均得到了有效抑制, 其原因与双光反馈 SLs 的情形类似 [30]. 然后, CW 模 (混沌带宽约为 3.73 GHz) 和 CCW 模 (混沌带宽约为 3.66 GHz) 混沌信号将作为驱动信号分别注入到两个 R-RSLs 对应的 CW 模和 CCW 模中, 驱动两个 R-RSLs 的 CW 模和 CCW 模进入混沌态.

4.2 R-SRLs 输出的混沌带宽

高速率的信息需要高带宽的混沌载波 [31]. 图 3 给出了混沌光注入下, R-SRLs 中两个模式的混沌带宽随注入强度和频率失谐的演化图. 从图中可看出, 对于给定的注入强度, 随着频率失谐从 0 GHz 增加到 50 GHz, 混沌带宽显现不断增大的趋势; 而对于一给定的频率失谐, 随着注入强度从 10 ns^{-1} 增加到 100 ns^{-1} , 混沌带宽呈现先增大后减小的趋势. 当 k 在 30—48 GHz, Δf_1 取 40—50 GHz 范围内时, 两模式的混沌带宽可达到 8 GHz 以上, 当 Δf_1 趋近于 50 GHz 时, CW 模和 CCW 模的混沌带宽分别达到 9.5 GHz 和 9.47 GHz. 因此, 相对于 D-SRL 的 CW 模和 CCW 模的混沌带宽 (分别为 3.73 GHz 和 3.66 GHz), 从 R-RSLs 输出的混沌带宽得到显著增强, 这为基于 SRLs 实现近 10 Gbit/s 混沌通信提供了可能.

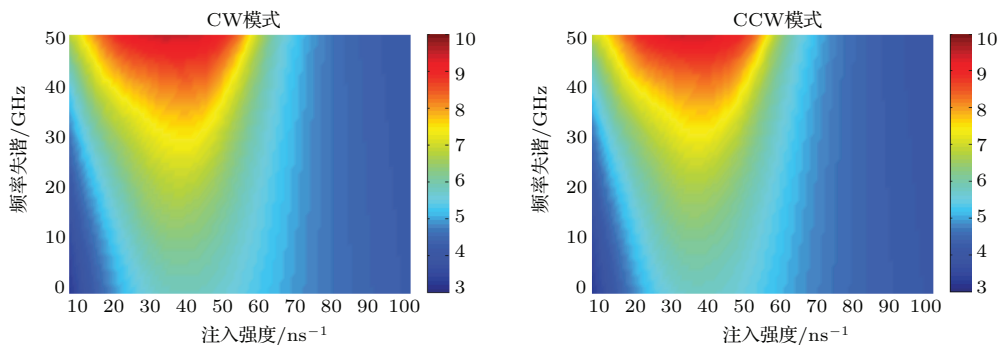


图 3 (网刊彩色) 在交叉双光反馈 D-SRL 输出的混沌光驱动下, R-SRLs 输出 CW 模式和 CCW 模式的混沌带宽随注入强度和频率失谐的变化

Fig. 3. (color online) Variation of chaotic bandwidth of CW (left) and CCW (right) patterns of R-SRLs with the detuning frequency and injection strength under chaotic optical driving of D-SRL with double optical cross-feedback.

4.3 混沌同步

图 4 给出了混沌光注入下, R-SRL1 和 R-SRL2

的同向模式之间互相关系数随注入强度和频率失谐变化的演化图. 从该图可看出, 在频率失谐为 -20 — 20 GHz 范围内, 对于任一确定的注入

强度, 互相关系数趋近于1; 在20—50 GHz, 而对于一确定的频率失谐, 随着注入强度从 10 ns^{-1} 增加到 100 ns^{-1} , 互相关系数显现不断增大的趋势, 注入强度增大到 30 ns^{-1} 以后, 互相关系数趋近于1. 结果表明: R-SRLs之间可以达到高质量的混沌同步. 图5给出了混沌光注入下, D-SRL和R-SRLs的同向模式之间互相关系数随注入强度和频率失谐变化的演化图. 从图5可以看出, 在注入强度为 $10\text{--}50 \text{ ns}^{-1}$, 对于一确定的注

入强度, 随着频率失谐从0 GHz增加到50 GHz, 互相关系数显现不断减小的趋势; 而对于一确定的频率失谐, 随着注入强度从 10 ns^{-1} 增加到 50 ns^{-1} , 互相关系数显现不断增大的趋势. 但随着注入强度的增大到 70 ns^{-1} 以后, D-SRL和R-SRLs之间的同步系数几乎不再随频率失谐的增大而变化. 可能的原因是在大失谐范围内, 随着注入强度的增大, R-SRLs被D-SRL的驱动信号锁定[32].

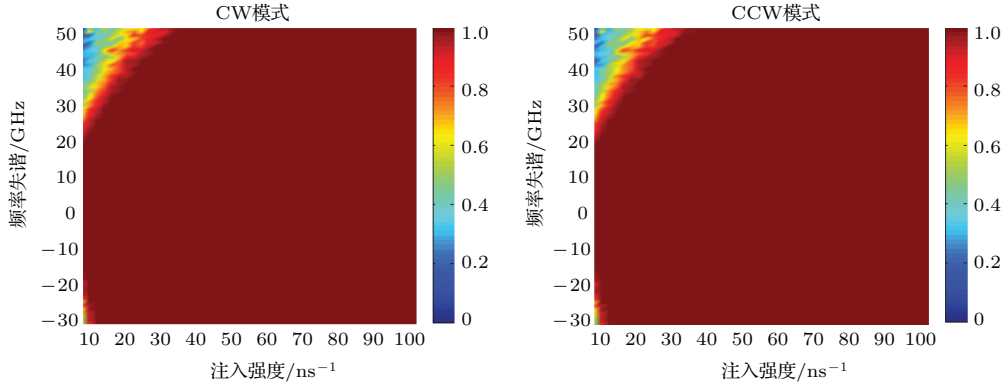


图4 (网刊彩色) 在交叉双光反馈 D-SRL 输出的混沌光驱动下, R-SRL1 与 R-SRL2 的同向模式之间的互相关系数随注入强度和频率失谐的变化

Fig. 4. (color online) Variation of cross-correlation coefficient of CW (left) and CCW (right) pattern between R-SRL1 and R-SRL2 with the detuning frequency and injection strength under chaotic optical driving of D-SRL with double optical cross-feedback.

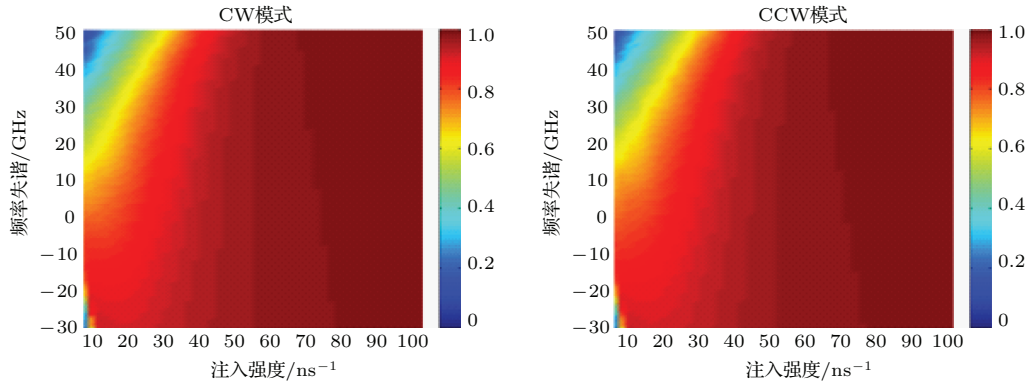


图5 (网刊彩色) 在交叉双光反馈 D-SRL 输出的混沌光驱动下, D-SRL 与 R-SRLs 的同向模式之间的互相关系数随注入强度和频率失谐的变化

Fig. 5. (color online) Variation of cross-correlation coefficient of CW (left) and CCW (right) pattern between D-SRL and R-SRLs with the detuning frequency and injection strength under chaotic optical driving of D-SRL with double optical cross-feedback.

图6给出了 $k = 30 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta f_{1,2} = 30 \text{ GHz}$, $\tau_c = 2 \text{ ns}$ 时, D-SRL, R-SRL1, R-SRL2 的混沌时间序列(a)、功率谱(b)、以及同向模式之间的互相关函数曲线(c). 其中, 图6(c1)和(c2)显示在时移 $\Delta t = 2 \text{ ns}$ 处两个模式的互相关系数最大值分别为0.7206和0.7146, 表明了D-SRL和R-SRLs之间较

低的关联性; 而图6(c3)和(c4)显示在时移 $\Delta t = 0$ 处互相关系数最大值为1, 可见SRLs1和SRLs2的对应模式之间达到很好的等时同步. 这为实现高速双向、双信道混沌通信提供了安全保障[10]. 因此, 在下面的计算中取: $k = 30 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta f_{1,2} = 30 \text{ GHz}$, $\tau_c = 2 \text{ ns}$.

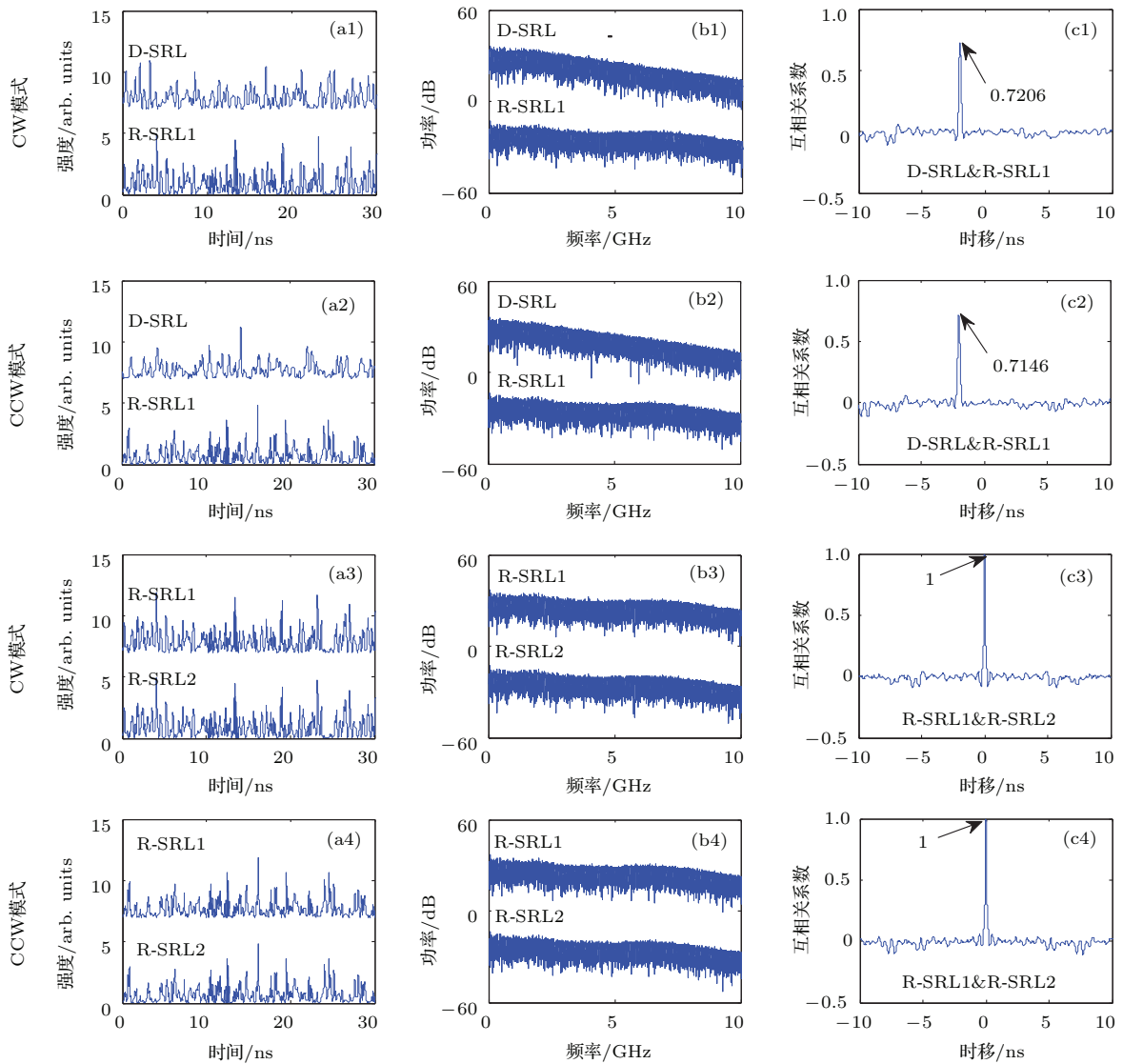


图6 (网刊彩色) 在交叉双光反馈 D-SRL 输出的混沌光驱动下, D-SRL, R-SRLs 的 cw 模式和 ccw 模式的时间序列 (a); 功率谱 (b) 和互相关函数曲线 (c)

Fig. 6. (color online) Time series (first row), power spectra (second row) and cross-correlation functions (third row) between two SRLs under chaotic optical driving of D-SRL with double optical cross-feedback, where the left two columns are for D-SRL and R-SRL1, and the right two columns are for R-SRL1 and R-SRL2.

4.4 R-SRLs 之间参数失配对同步性能的影响

激光器的之间的参数失配会影响激光器之间的同步性能, 而在现实中, 也很难得到两个参数完全一致的激光器. 因此, 有必要研究激光器之间的参数失配对于系统混沌同步性能的影响. 这里主要考察了 R-SRLs 的内部参数 $\alpha, \gamma, \kappa, k_d, k_c$ 和 s 对 R-SRLs 之间同步的影响. 相对参数失配的定义如下:

$$\Delta c = (c_2 - c_1)/c_1, \quad (8)$$

式中, 下标 1, 2 表示 R-SRL1 和 R-SRL2, c 表示 R-SRLs 的内部参数 $\alpha, \gamma, \kappa, k_d, k_c$ 和 s , Δc 表示各参

数的相对失配值.

图 7 给出了各参数的参数失配对 R-SRL1 和 R-SRL2 同模式之间同步性能的影响. 从图 7 可以看出: 相对参数失配在 $-10\%—10\%$ 之间, 参数 k_d 和 k_c 对应 CW 模和 CCW 模的互相关系数都为 1, 相比而言, 参数 s 对应 CW 模和 CCW 模的互相关系数有轻微的下降, 最小值是 0.998, 这说明 k_d, k_c, s 对 CW 模和 CCW 模的同步性能影响不大; 而参数 α, γ, κ 则对 CW 模和 CCW 模的同步性能有较大影响. 因此, 在实际中可以由针对性的选择参数 α, γ, κ 匹配度更高的激光器, 从而有利于保证系统的通信质量.

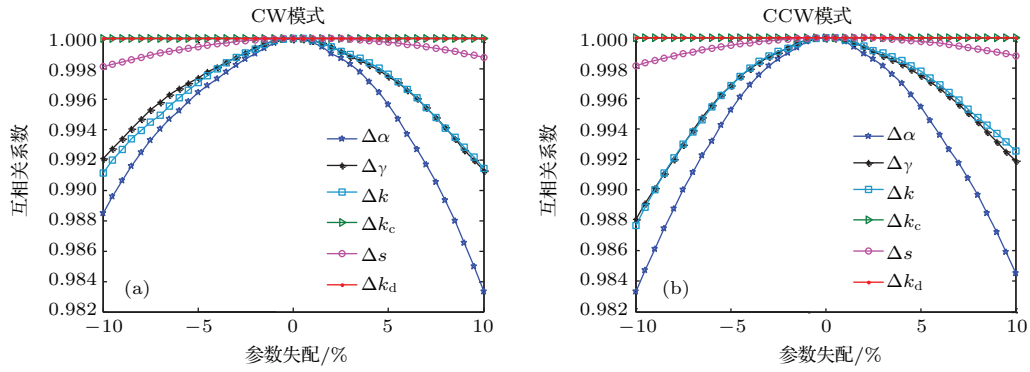


图7 (网刊彩色) R-SRL1 和 R-SRL2 各同向模式之间互相关系数随参数失配的变化

Fig. 7. (color online) Maximum of cross-correlation coefficient for CW: (a) and CCW; (b) pattern between R-SRL1 and R-SRL2 versus mismatched internal parameters.

4.5 信息的加载与解调

下面分析该系统基于 R-SRLs 各模式之间的等时混沌同步来实现高速双向、双信道混沌通信的相关性能. 图8给出了四个 2.5 Gbit/s

的随机方波信息(图8(a))以5%的调制深度分别加载到 R-SRL1 和 R-SRL2 的 CW 模和 CCW 模混沌载波上经 10 km 单模保偏光纤传输的通信性能. 单模保偏光纤的参数为 $\beta_2 = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\gamma_F = 0.0015 \text{ W}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$. 加载信息后的混沌输出时

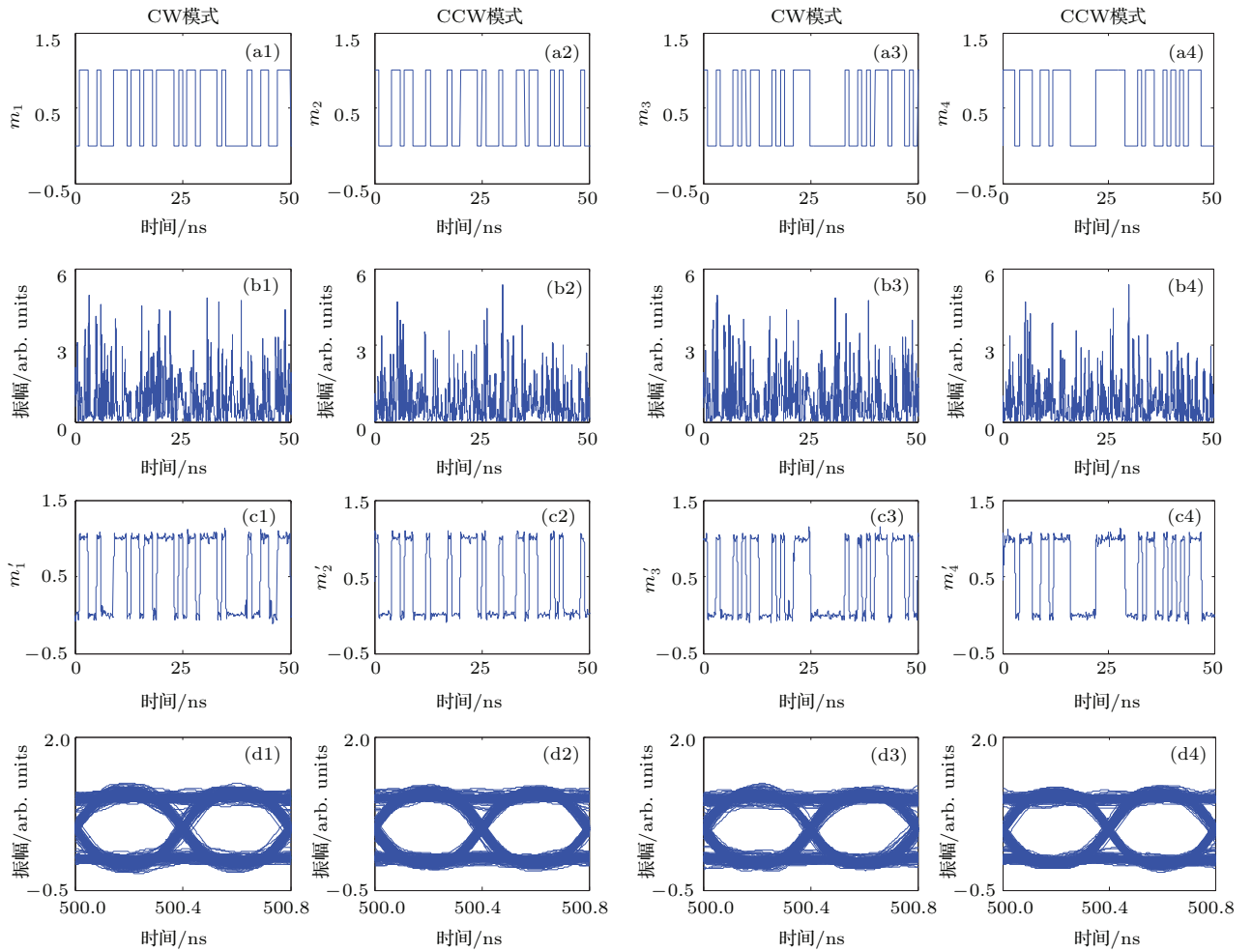


图8 (网刊彩色) 2.5 Gbit/s 信息的加载与解调 (a) 为加载的伪随机比特序列; (b) 为加载了信息后的混沌时间序列; (c) 和 (d) 分别为解调信息的时间序列和对应眼图

Fig. 8. (color online) Encoding and decoding of 2.5 Gbit/s message: (a) original messages; (b) chaotic time series after encoding original messages; (c) recovered messages; (d) eye diagrams of decoded messages.

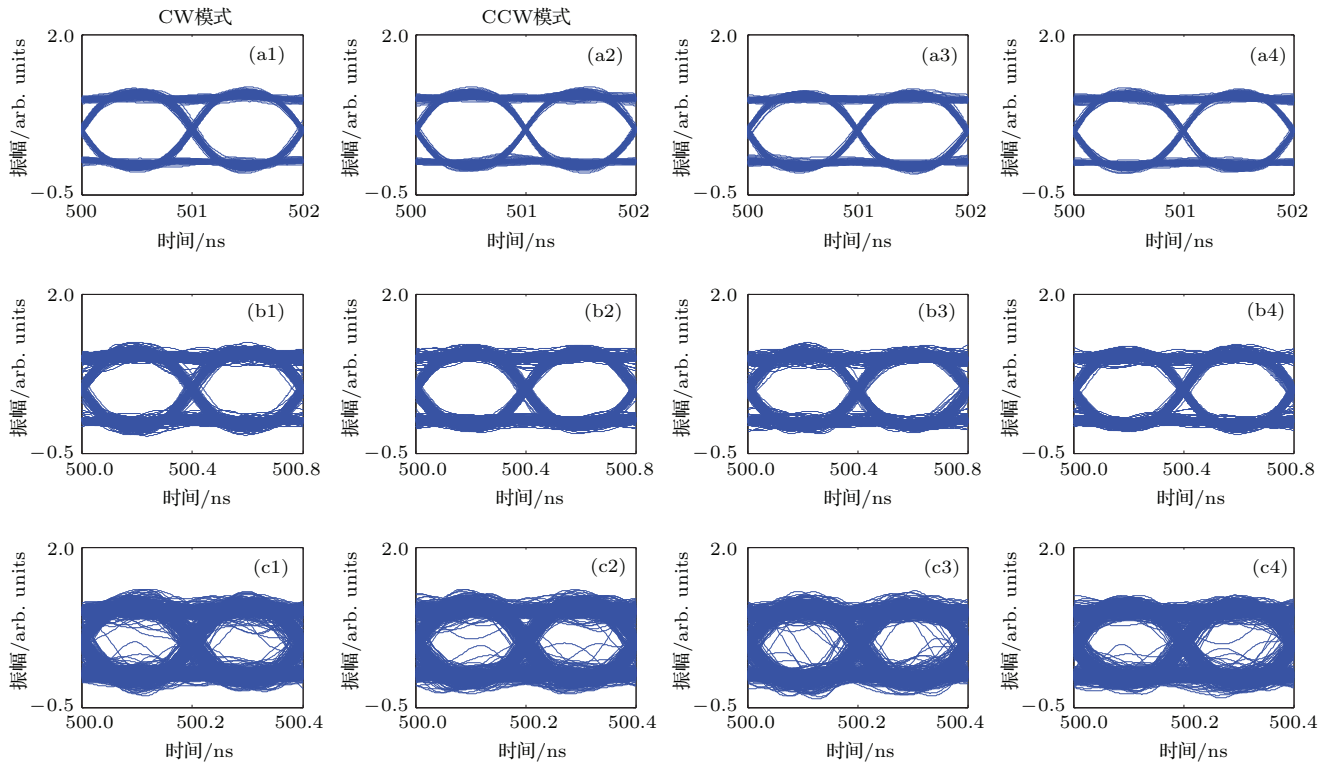


图9 (网刊彩色) (a) 1 Gbit/s; (b) 2.5 Gbit/s; (c) 5 Gbit/s 解调信息的眼图

Fig. 9. (color online) Eye diagrams of decoded messages for 1 Gbit/s (a); 2.5 Gbit/s (b); 5 Gbit/s (c).

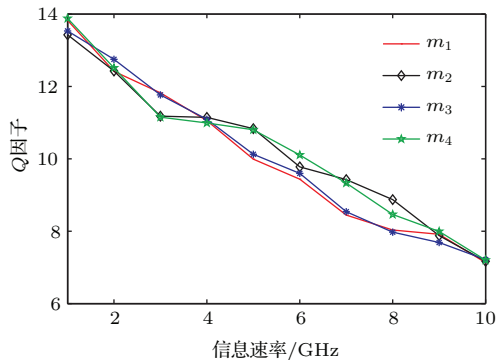


图10 (网刊彩色) 四个信道的解调信息Q因子值随着信号速率的演变曲线

Fig. 10. (color online) Q factors of four channels vary with message rate.

间序列如图8(b)所示. 可见信息被很好地隐藏在混沌载波中. 图8(c)和(d)为解调信息的时间序列和对应眼图. 从图8(c)可得, 2.5 Gbit/s信息经过系统传输后可以得到很好地恢复. 眼图清晰可见, 对应 Q 值分别为12.42, 11.42, 12.75, 12.51, 表明了系统可以有效地实现高速双向、双信道的通信. 图9(a), (b), (c)进一步给出1 Gbit/s, 2.5 Gbit/s, 5 Gbit/s的随机方波信息经过系统传输后解调的眼图. 随着信息速率从1 Gbit/s到5 Gbit/s, 眼图质量逐渐变差, 其四个信道的 Q 因子值降为9.99,

10.83, 10.12, 10.80. 图10给出了 Q 因子值随着信息速率的变化曲线. 从图中可看出, Q 因子值随着信息速率的增加而降低, 速率为10 Gbit/s时, Q 因子值仍然保持在6以上, 所对应的误码率低于 10^{-9} [33], 说明该系统具有10 Gbit/s的双向、双信道信息保密传输的潜力.

5 结论

本文提出了一种基于SRLs的高速双向、双信道混沌通信系统方案. 利用SRLs的动态速率方程组, 建立了该系统的理论模型, 并对其混沌载波特性和信息传输特性等进行了仿真分析. 结果表明: D-SRL在交叉双光反馈条件下可以产生延时特性被良好抑制的混沌信号. 该信号通过外部光注入, 可以使两个R-SRLs的CW模式以及CCW模式分别实现良好的等时混沌同步. 在恰当的注入强度和频率失谐条件下, 两个R-SRLs输出的混沌载波带宽可被显著增强. 进一步的, 通过在两个R-SRLs的两个模式(CW模和CCW模)上分别加载调制信号, 可以用作信息的双向、双信道保密传输. 当传输距离为10 km、信息速率为10 Gbit/s时, 解调信息 Q 因子值也达6以上(对应误码率低于 10^{-9}).

参考文献

- [1] Pecora L M, Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [2] Wu L, Zhu S Q, Ni Y 2007 *Eur. Phys. J. D* **41** 349
- [3] Wang X F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104208 (in Chinese)
[王小发 2013 物理学报 **62** 104208]
- [4] Li K, Wang A B, Zhao T, Wang Y C 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 144207 (in Chinese) [李凯, 王安帮, 赵彤, 王云才 2013 物理学报 **62** 144207]
- [5] Yan S L 2014 *Chin. Phys. B* **23** 090503
- [6] 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
- [7] Deng T, Xia G Q, Wu Z M, Lin X D, Wu J G 2011 *Opt. Express* **19** 8762
- [8] Deng T, Xia G Q, Cao L P, Chen J G, Lin X D, Wu Z M 2009 *Opt. Commun.* **282** 2243
- [9] Zhang W L, Pan W, Luo B, Zou X H, Wang M Y, Zhou Z 2008 *Opt. Lett.* **33** 237
- [10] 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
- [11] Yamamoto T, Oowada I, Yip H, Uchida A, Yoshimori S, Yoshimura K, Muramatsu J, Goto S, Davis P 2007 *Opt. Express* **15** 3974
- [12] Jiang N, Pan W, Luo B, Xiang S Y, Yang L 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1094
- [13] Wu J G, Wu Z M, Tang X, Fan L, Deng W, Xia G Q 2013 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **25** 587
- [14] Sorel M, Giuliani G, Scirè A, Miglierina R, Donati S, Laybourn P J R 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 1187
- [15] Yuan G H, Yu S Y 2007 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **13** 1227
- [16] Yuan G H, Yu S Y 2008 *IEEE J. Quantum Electron.* **44** 41
- [17] Fürst S, Sorel M 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 366
- [18] Mashal L, Van der Sande G, Gelens L, Danckaert J, Verschaffelt G 2012 *Opt. Express* **20** 22503
- [19] Chlouverakis K E, Mikroulis S, Stamataki I, Syvridis D 2007 *Opt. Lett.* **32** 2912
- [20] Li N Q, Pan W, Xiang S Y, Luo B, Yan L S, Zou X H 2013 *Appl. Opt.* **52** 1523
- [21] Li N Q, Pan W, Yan L S, Luo B, Zou X H 2014 *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* **19** 1874
- [22] Kang Z X, Sun J, Ma L, Qi Y H, Jian S S 2014 *IEEE J. Quantum Electron.* **50** 148
- [23] Nguimdo R M, Verschaffelt G, Danckaert J, Leijtens X, Bolck J, Van der Sande G 2012 *Opt. Express* **20** 28603
- [24] Vawter G A, Mar A, Hietala V, Zolper J, Hohimer J 1997 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **9** 1634
- [25] Memon M I, Mezosi G, Li B, Lu D, Wang Z R, Sorel M, Yu S Y 2009 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21** 733
- [26] Li N Q, Pan W, Xiang S Y, Yan L S, Luo B, Zou X H, Zhang L Y 2013 *Opt. & Laser Technol.* **53** 45
- [27] Sunada S, Harayama T, Arai K, Yoshimura K, Tsuzuki K, Uchida A, Davis P 2011 *Opt. Express* **19** 7439
- [28] Agrawal G P 2001 *Nonlinear Fiber Optics* (3rd Ed.) (California: Aca-demic Press) p49
- [29] Nguimdo R M, Verschaffelt G, Danckaert J, Van der Sande G 2012 *Opt. Lett.* **37** 2541
- [30] Wu J G, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Opt. Express* **17** 20124
- [31] 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
- [32] Someya H, Oowada I, Okumura H, Kida T, Uchida A 2009 *Opt. Express* **17** 19536
- [33] Agrawal G P 2002 *Fiber-Optic Communications Systems* (3rd Ed.) (New York: John Wiley & Sons, Inc.) p166

High speed bidirectional dual-channel chaos secure communication based on semiconductor ring lasers^{*}

Wang Shun-Tian Wu Zheng-Mao Wu Jia-Gui Zhou Li Xia Guang-Qiong[†]

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

(Received 5 February 2015; revised manuscript received 10 March 2015)

Abstract

Chaos is a fascinating phenomenon of nonlinear dynamical systems, and optical chaos communication has been one of potential frontier techniques to implement secure transmission of information. In this paper a novel high-speed bidirectional dual-channel chaos secure communication system is proposed based on semiconductor ring lasers (SRLs). In this system, the time delay signatures in chaotic output of clockwise (CW) and counterclockwise (CCW) patterns from a driving SRL (D-SRL) are firstly suppressed by using the double optical cross-feedback frame. Then, the chaotic output of D-SRL is injected into two response SRLs (R-SRLs) to drive the corresponding CW and CCW patterns of R-SRLs that are synchronized and bandwidth enhanced simultaneously. Thus, a bidirectional dual-channel chaos communication could be built based on chaotic synchronization of the two R-SRLs. We theoretically investigated the chaotic characteristics of a D-SRL under double optical cross-feedback and the chaotic synchronization features between R-SRL1 and R-SRL2 under different driving conditions. Results show that the time delay signatures of CW and CCW patterns of D-SRL could be effectively hidden under proper feedback conditions. The bandwidths of CW and CCW patterns of the D-SRL could be enhanced significantly. Furthermore, high-quality isochronous synchronization between R-SRL1 and R-SRL2 can be realized by choosing appropriate injection strength and detuning frequency in D-SRL and R-SRLs. Finally, the communication performances of bidirectional dual-channel chaos secure communication based on this proposed system are preliminarily examined and discussed, and the simulated results demonstrate that for 10 Gbit/s message, the Q factor of decoded message could be maintained above 6 after 10 kilometers distance transmission.

Keywords: semiconductor ring lasers, chaos secure communication, dual-channel, bidirectional

PACS: 42.55.Px, 05.45.-a, 05.45.Gg, 05.45.Vx

DOI: [10.7498/aps.64.154205](https://doi.org/10.7498/aps.64.154205)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China, China (Grant Nos. 61178011, 61275116, 61475127, 11474233), the Foundation of Chongqing College Key Yung Teachers, China (Grant No. 102060-20600512), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Southwest university, China (Grant Nos. XDJK2013B037, XDJK2014C079, SWU114004).

† Corresponding author. E-mail: gqxia@swueducn